JUNIO 2009

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



SANIDAD
¿Pueden prevenirse las pandemias?

HISTORIA DE LA CIENCIA
Vito Volterra, en la encrucijada del saber del XIX

MATERIALES
Llega el láser semiconductor verde

BIOLOGIA
¿Por qué desaparecen las colmenas?

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

ENERGIA OSCURA

¿O un vacío cósmico local? Otras explicaciones de la expansión acelerada

00393
9 770210 136004

SUMARIO

Junio de 2009/ Número 393



58

El verde ha sido un color vedado a los láseres semiconductores.



22

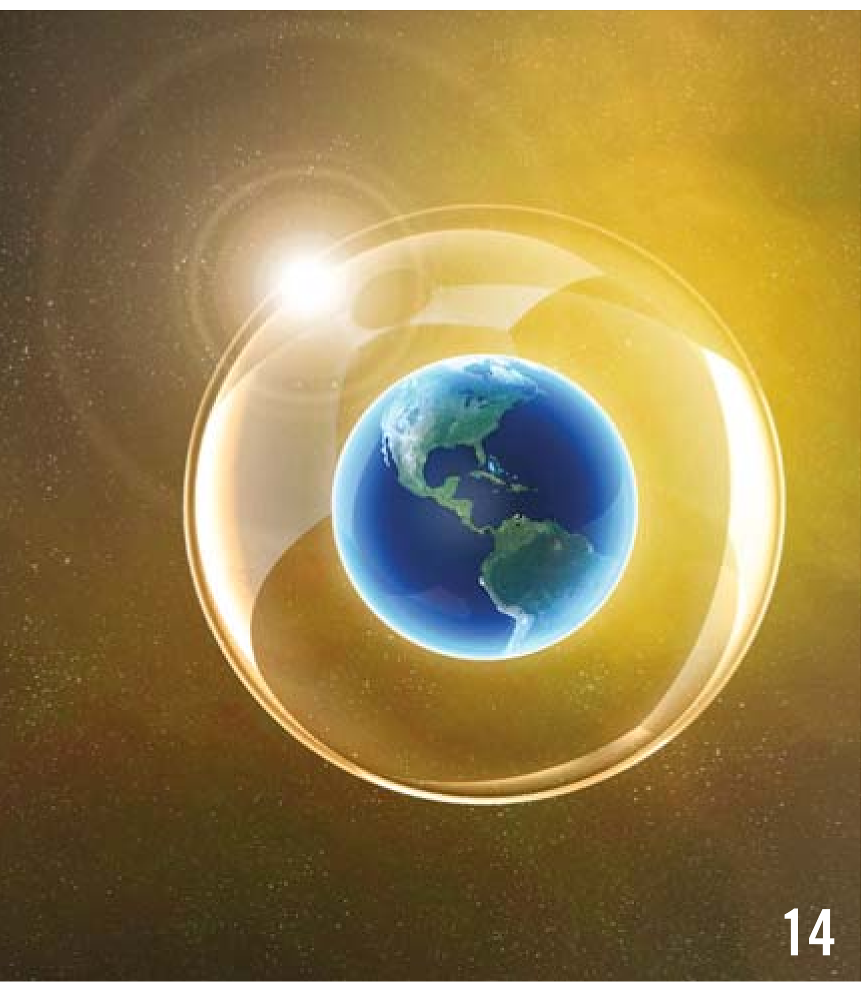
Si desapareciesen las abejas polinizadoras, muchas frutas y verduras de consumo habitual se convertirían en manjar de reyes.



64

Los animales salvajes han transmitido a los humanos numerosos patógenos, entre ellos el VIH.

ARTICULOS



Relajar el principio copernicano podría explicar la expansión acelerada del universo.



Podría estar confundiéndose una reacción normal a la guerra con una dolencia crónica.



Los inmensos dinosaurios de Teruel.

SECCIONES

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Peter Brown, Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares y Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Stuart F. Brown, W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Christie Nicholson, Michelle Press, Michael Shermer, Sarah Simpson
MANAGING EDITOR, ONLINE Ivan Oransky
ART DIRECTOR Edward Bell
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Yee
VICE PRESIDENT Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE, AND GENERAL MANAGER Michael Florek
MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Kevin Hause

DISTRIBUCION
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Ramón Pascual: *Energía oscura o vacío cósmico*; Joandomènec Ros: *Salvar la abeja melífera*; Ernesto Lozano Tellechea: *La realidad de los cuantos*; Anna Ferran: *Evolución de la visión de los colores en los primates*; Luis Bou: *Prevención de pandemias, Puesta al día* y *Apuntes*; Marián Beltrán: *La trampa del estrés postraumático*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes* e *Ideas aplicadas*; Tanja Sachse: *Curiosidades de la física*



Portada: Kenn Brown, Mondolithic Studios

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X   Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Auto-reproducción. «Puede que fabricar una máquina con capacidad de construirse a sí misma se considere un imposible perteneciente a la categoría de los móviles perpetuos. En colaboración con Roger Penrose, he enfocado el problema de un modo radical, sin el estorbo de unidades prefabricadas tales como ruedas y células fotoeléctricas. Nuestra idea fue diseñar y, de ser posible, construir unas unidades básicas o módulos con unas propiedades tales, que pudiéramos construir con ellas una máquina auto-reproductora. —L. S. Penrose»

Menús espaciales. «El problema de comer y beber en las condiciones de ingravidez propias del espacio, hace tiempo un tema de especulación entre los escritores de fantasía científica, ya está investigándose en un laboratorio volante. Resultados preliminares apuntan a que los viajeros espaciales beberán de botellas de plástico exprimibles y a que los cocineros espaciales tendrán que especializarse en elaboraciones semilíquidas semejantes a los alimentos para bebés. Según un informe publicado en *Journal of Aviation Medicine,* casi todos los voluntarios descubrieron que beber de un recipiente abierto era una operación frustrante y sobradamente desaseada. En condiciones de ingravidez incluso un vaso de agua alzado lentamente propende a proyectar contra la cara una masa de líquido en forma de ameba. Apenas un poco mejor resultaba beber con una paja. Dentro del agua ingrávida permanecían suspendidas burbujas de aire y los sujetos ingerían más aire que agua.»

...cien años

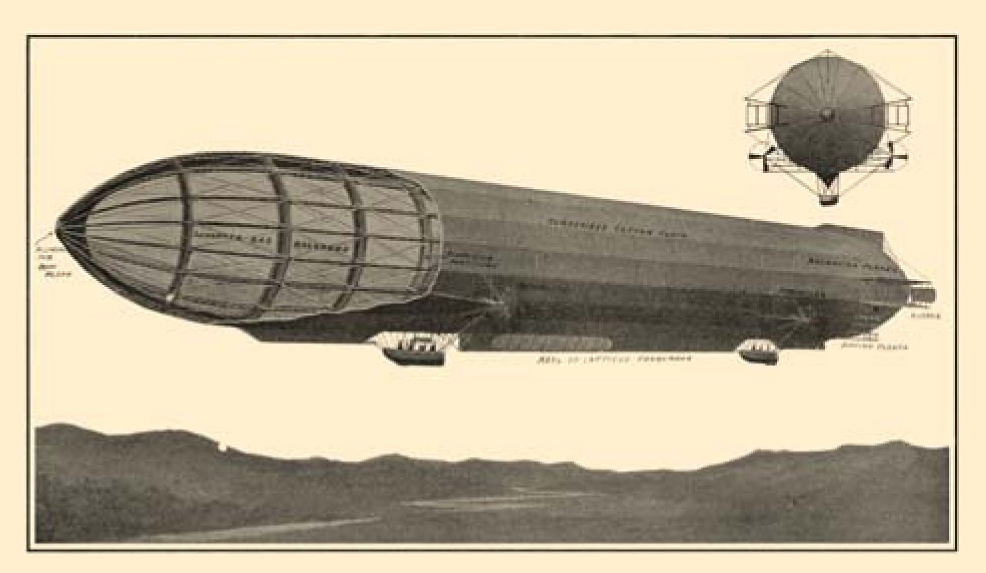
Se necesitan escritores. «En EE.UU. se exhiben películas cinematográficas en unos diez mil teatros y salas. A la rápida difusión de esta nueva diversión la ha acompañado un cambio acusado en el gusto del público. Antes, los espectadores se conformaban viendo a los empleados de una fábrica yendo y viniendo de su trabajo, con trenes que partían y llegaban, y escenas similares. En la actualidad, hay que desarrollar un argumento más o menos coherente, razón por la cual los realizadores cinematográficos se han visto obligados a escribir unos guiones (o, al menos, idearlos) que se representan delante de la cámara.»

Cielo arriba. «La ilustración inferior ofrecerá al lector una excelente idea de la construcción general de la última aeronave Zeppelin, el ‘Zeppelin II’ [también designada LZ5], que en fecha reciente ha realizado un vuelo récord de unos 1400 kilómetros. La aeronave consta de un armazón en celosía de extremos cónicos, que encierra 17 sacos de gas independientes llenos de hidrógeno. Su fuerza de sustentación es de unas 16 toneladas. Hay planes en marcha para establecer líneas regulares de aeronaves entre varias de las ciudades alemanas más pobladas.»

La ley del caracol. «El Ministerio francés de Agricultura, tras un cuidadoso examen del asunto, ha establecido el ‘estatuto legal de los caracoles’, definiéndolos como animales perjudiciales para la vegetación y, por ello, sujetos a captura y destrucción en todo momento y en todas las estaciones del año. La decisión ha causado consternación entre las numerosas personas que se ganan la vida recogiendo caracoles para venderlos. Los caracoles gozan de un gran favor entre los sibaritas franceses; en París se ingieren enormes cantidades de ese molusco. En el invierno de 1900 el consumo de caracoles en la capital de Francia ascendió a unas 800 toneladas.»

...ciento cincuenta años

Seguros y olvidados. «Las ventajas de construir los barcos con compartimentos estancos quedaron totalmente patentes en el caso del vapor de hélice de casco de hierro *Edinburgh*, que hace la travesía entre la ciudad de Nueva York y Glasgow. El 6 de junio, a 300 kilómetros al este de Saint Johns, Terranova [unos 560 kilómetros al norte del lugar donde el RMS *Titanic* se hundiría 53 años después], chocó con un iceberg en medio de una densa niebla y se rompieron sus planchas de proa en la colisión. Al estar formado por compartimentos herméticos al agua, dos de éstos se llenaron enseguida, pero los demás mantuvieron el buque a flote durante treinta horas, tiempo durante el cual regresó a Saint Johns a toda máquina. De no haber sido construido por compartimentos, el buque se habría ido al fondo a la media hora de haber chocado.»



SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. C, Nº 26, 26 DE JUNIO DE 1909

Más ligero que el aire, en vuelo: El Zeppelín II, 1909.

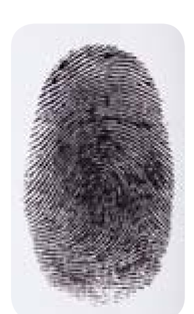
¿Qué ha sido de ...?

Recopilación de Philip Yam

Volutas "sensacionales"

Las crestas papilares de las yemas de los dedos no sirven sólo para asir objetos mejor o para la identificación personal, nos facultan también para percibir texturas finas y objetos diminutos.

Investigadores franceses han construido dos sensores mecánicos: uno, con yema dibujada, el otro, con yema lisa. Hicieron que los sensores rozasen diversas superficies texturadas y midieron las vibraciones recogidas por los dibujos dactilares. Cada resalte ampliaba la gama de frecuencias susceptibles de ser detectadas por los corpúsculos pacinianos, unas terminaciones nerviosas de la piel. El trabajo, publicado en la red por *Science* de 29 de enero, contribuye a explicar cómo procede el sentido del tacto para darnos información precisa sobre nuestro entorno inmediato.



—*Kate Wilcox*

Células madre: ¡Adelante!

Investigadores de la Universidad del Noroeste han logrado detener —y, en algunos casos, invertir— los efectos de las fases iniciales de la esclerosis múltiple, enfermedad en la que el sistema inmunitario ataca al sistema nervioso central. Extrajeron de la médula ósea células hematopoyéticas pluripotentes, responsables de la renovación de las células sanguíneas, y destruyeron mediante fármacos las células inmunitarias allí presentes. Al ser reinyectadas, las células madre parecieron "reinicializar" las defensas del organismo, de modo que ya no se dirigieran contra tejidos sanos. El estudio, publicado en *Lancet Neurology* el 30 de enero, se efectuó en sólo 21 enfermos. Serán necesarios ensayos más completos para evaluar la técnica.

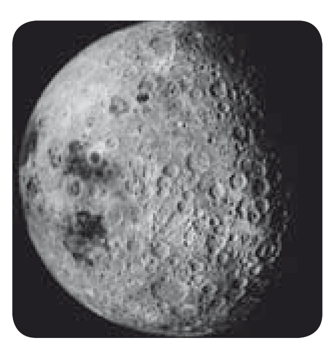
Los datos sobre terapias con células madre tendrían que multiplicarse en breve, pues la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos estadounidense (FDA) aprobó en enero el primer ensayo con células madre embrionarias humanas, una decisión largamente esperada [*véase* "Investigación con células madre"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2004]. Ello permitirá que Geron Corporation, de Menlo Park, en California, trate con células madre embrionarias a 10 pacientes que sufren lesiones en la médula espinal.

—*Kate Wilcox*

Cuando la Luna nos mostraba su cara oculta

Es posible que hace unos cuatro mil millones de años, la Luna le mostrase a la Tierra la que hoy es su cara oculta. Mark Wieczorek y Mathieu Le Feuvre, del Instituto de Física de la Tierra, en París, conjeturan que, si la Luna hubiera mostrado siempre la misma cara, contaría con más cráteres en su borde delantero, pues allí hubiera sufrido un intenso bombardeo durante los primeros tiempos del sistema solar [*véase* "La nueva Luna"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2004]. Los cráteres jóvenes siguen esa pauta. Los antiguos, en cambio, se acumulan en el borde posterior, lo que lleva a pensar que en otros tiempos éste pudo corresponder al sentido de avance. El impacto de un asteroide o cometa habría provocado que la Luna girase 180 grados, hasta su orientación actual. La revista *Icarus* dio a conocer esta conclusión en la red el 31 de diciembre de 2008.

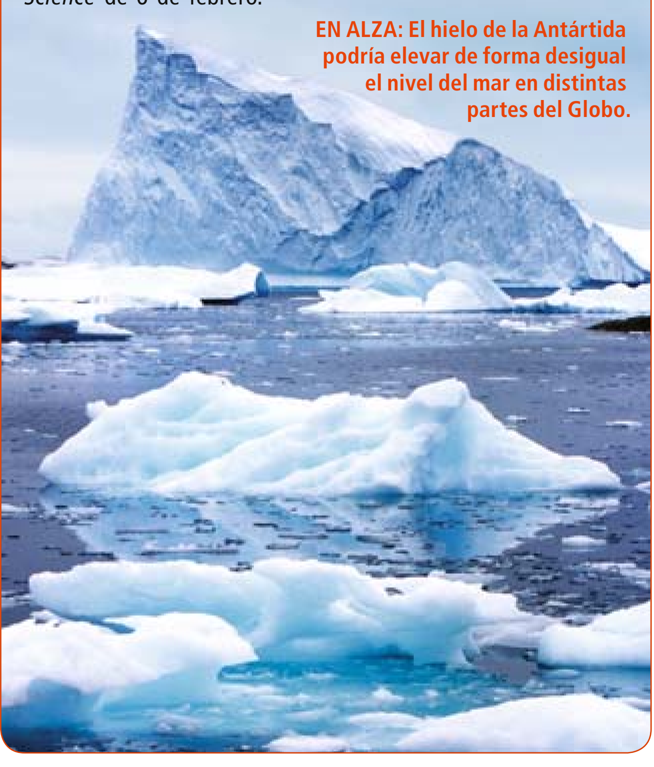
—*John Matson*



NO VISIBLE: La cara oculta de la Luna, desde la *Apollo 16*.

Fusión desastrosa

Están saliendo a la luz nuevos detalles sobre la elevación del nivel del mar resultante de la fusión de los hielos polares [*véase* "Dinámica de los casquetes glaciales"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2008]. Investigadores de las universidades de Toronto y la estatal de Oregón conjeturan que tal elevación no sería uniforme en todo el planeta. Han examinado la lámina de hielo que cubre la Antártida Occidental, con suficiente hielo depositado sobre tierra firme para elevar en unos cinco metros los niveles marinos, si todo ese hielo fuese a parar al agua. Pero tan enorme redistribución de masa en la Antártida disminuiría la atracción gravitatoria en la zona y desplazaría el eje de rotación de la Tierra en unos 500 metros. Tomados en consideración estos y otros datos, calculan que el nivel del mar descendería en las cercanías de la Antártida, mientras que el hemisferio norte se elevaría entre uno y dos metros más de lo estimado previamente. Puede consultarse el análisis en *Science* de 6 de febrero.



EN ALZA: El hielo de la Antártida podría elevar de forma desigual el nivel del mar en distintas partes del Globo.

Erratum corrige

En el artículo "Vigilancia de ensayos nucleares", del mes de mayo, página 70, se dice que Corea del Norte ha separado uranio para construir bombas atómicas. Sin embargo, es plutonio lo que ha separado.

SETH JOEL *Getty Images (huella digital)*; JOE SOHM *Getty Images (hielo)*; CORTESIA DE NSSDC Y NASA (*Luna*)

AUDICION

Proteína anti-estruendo

Los entusiastas de discotecas y conciertos de música rock que, aun gustando de niveles sonoros de 110 decibelios, deseen conservar su capacidad auditiva, podrían algún día lograrlo engullendo una píldora en lugar de ponerse un tapón en los oídos. Ha sido detectado el mecanismo biológico que limita en el oído los efectos lesivos de sonidos intensos. Cuando un sonido es clasificado en el cerebro como demasiado fuerte, se dispara una proteína ubicada en las células ciliadas del oído interno, llamada nAChr, que al entrar en servicio limita la capacidad de respuesta de las células ciliadas. Los ratones transgénicos creados para producir una nAChr más potente se demostraron incapaces de percibir sonidos suaves, y su audición sufrió menos lesiones permanentes cuando se les aplicaron estruendos de 100 dB en las orejas. "Sabemos que algunos compuestos pueden modificar la proteína", explica Paul Fuchs, de la Universidad Johns Hopkins, que ha publicado estas observaciones en *PLoS Biology*. "Pero hemos de saber más sobre las dosis concretas" —añade—, antes de que pueda haber un fármaco protector contra sonidos fuertes.

—Kate Wilcox



LOS ASISTENTES a conciertos de rock podrían proteger su audición tomando una píldora.

BIOTECNICA

Caldeo sónico de genes

El calentamiento producido por ondas sonoras puede activar genes en el organismo, acaba de demostrar un equipo de investigadores de la Universidad Victor Segalen de Burdeos. A ratones obtenidos por ingeniería genética, provistos de un gen bioluminiscente que contiene un tramo de ADN termosensible, se les aplicaron impulsos ultrasónicos de gran intensidad enfocados sobre un segmento de 0,5 mm de anchura de las patas, lo que caldeaba la zona inmediatamente subyacente a la piel hasta unos 43 ºC. La luz emitida revelaba que el gen había sido activado. Esta técnica podría resultar útil en la terapia génica, basada en la introducción de ADN benéfico en los enfermos. El momento y la forma en que estos genes se activan reviste máxima importancia; de hecho, se emplean ya compuestos de poca masa molecular y radiaciones ionizantes para tal fin. Pero los compuestos carecen de precisión y las radiaciones pueden provocar cánceres. El problema de la activación por ultrasonidos consiste en lograr que las ondas ultrasónicas penetren, sin dañar, hasta la profundidad suficiente para alcanzar órganos.

—Charles Q. Choi

EVOLUCION

Nuevo menú para escarabajos peloteros

Las heces son tan ricas en bacterias nutrientes, que hasta 80 o más especies de escarabajo pueden vivir en la misma área alimentándose de ellas. En vista de la muy intensa competencia por los excrementos, una de las especies ha abandonado estos desechos y se ha especializado en la depredación. Tras 11 meses de grabaciones con cámaras infrarrojas en la jungla peruana, Trond Larsen, de la Universidad de Princeton, y sus colaboradores han descubierto que un escarabajo pelotero nocturno de 8 milímetros de longitud devora ciempiés 13 veces mayores que él. El escarabajo mata a la víctima aferrándola con las patas; incrusta después, a modo de cuña, su cabeza aserrada entre los segmentos de la presa y secciona en dos el cuerpo. La cabeza de esta especie es inusitadamente pequeña para un escarabajo pelotero, lo que resulta tanto mejor para hurgar en el interior de un cadáver y devorar sus entrañas.

—Charles Q. Choi

DATOS

Muerte arbórea

Los árboles del oeste de Norteamérica están muriendo a un ritmo acelerado durante los últimos decenios, según Phillip J. van Mantgem y sus colegas del Servicio Geológico de Estados Unidos. Este equipo ha estudiado diversos parajes de tres regiones: la costa noroeste del Pacífico, California y el interior continental, cerca de las Montañas Rocosas. La causa parece ser que las temperaturas se han elevado en esos lugares, lo que reduce el agua disponible al tiempo que refuerza la actividad de un hongo que daña la corteza. En consecuencia, los árboles son, en promedio, más jóvenes y más pequeños. Y con menor capacidad de retener carbono.

Mortalidad arbórea anual por 1000 árboles en:

1984:	7,1
2001:	11,4

Población arbórea de las parcelas estudiadas en:

1984:	58.736
2001:	47.641

Incremento calculado anual de la mortalidad (por 1000 árboles): 4

Años que tardará en duplicarse la mortalidad arbórea en:

Costa noroeste del Pacífico:	17
California:	25
Interior continental:	29

Fuente: Science, *23 de enero, 2009*

RYAN MCVAY *Getty Images (fans)*; MATT COLLINS

INGENIERIA

Turbinas eólicas y ventiladores

Las diferencias entre las paletas de una turbina eólica y las de un ventilador de techo se deben a unos criterios de diseño opuestos: la turbina eólica está concebida para generar electricidad de modo eficiente captando la velocidad del viento; el ventilador de techo debe impulsar aire a baja velocidad con unos componentes de bajo precio.



Para que el precio de la planta motriz se mantenga bajo, la turbina debe captar la energía contenida en un aire en movimiento rápido y rotar a una velocidad relativamente alta, aunque, para que no se genere un ruido excesivo, dentro de ciertos límites. (La rotación lenta requeriría componentes más pesados y caros.) Tal conversión de energía, para ser eficiente, obliga a usar unas paletas de tipo sustentador, similares a alas de avión, de contorno aerodinámico alabeado y ahusado. Este diseño crea en el viento una diferencia de presión —alta sobre una cara de la paleta, baja sobre la otra cara— que hace girar a las paletas. Una combinación de consideraciones estructurales y económicas impone el uso de tres paletas esbeltas en la mayoría de las turbinas eólicas; menos paletas supondrían una dinámica estructural más compleja, y más paletas, gastar más en paletas y en los anclajes de éstas en la turbina.

El ventilador de techo, por otra parte, se construye para mover el aire suavemente y que los ocupantes de la habitación se sientan así confortables. Los ingenieros trabajan para minimizar el ruido mientras el ventilador rota (por razones de seguridad) a baja velocidad y para mantener bajos los costos de fabricación y, por tanto, el precio de venta. El rendimiento energético no es lo que más preocupa, pues el funcionamiento es barato: un ventilador de techo típico que funcione 24 horas al día consume unos 60 kilowatt-hora al mes. Por ello, la mayoría de los ventiladores de techo incorporan dispositivos de un rendimiento que, en comparación, es bajo: las paletas inclinadas, al girar, desvían el aire verticalmente. Esas paletas anchas y planas son de fabricación barata y trabajan bien como dispositivos de arrastre aerodinámico. Cuantas más paletas, hasta llegar a cierto punto, mejor, y el habitual sistema de cuatro o cinco paletas es el resultado de la búsqueda de una solución de compromiso entre eficiencia y gastos.

—Dale E. Berg,
Laboratorios Nacionales Sandia

ESTADISTICA

Inutilidad de los perfiles

En términos matemáticos, el perfilado de individuos —el registro y análisis de sus características psicológicas, raciales o conductuales— no está justificado. William Press, de la Universidad de Texas en Austin, ha descubierto, mediante análisis estadísticos, que la selección de sospechosos basada en su etnicidad no es más eficaz que el muestreo al azar, porque el número de quienes no son terroristas es enormemente mayor que el de terroristas. La metodología óptima consistiría en utilizar un "muestreo en media cuadrática sesgada", de modo que un sujeto que tuviera nueve veces mayor probabilidad de ser un terrorista que el pasajero medio fuese investigado con triple frecuencia. Este proceder permitiría descubrir a mayor número de terroristas, debido, en parte, a que se evitaría la reiterada inspección de unas mismas personas inocentes por el mero hecho de que casan con el perfil. Dado que tal estrategia sería difícil de poner en práctica, Press afirma que, matemáticamente, lo más razonable es no crear perfiles.

—John Matson



La inspección orientada por perfiles no es más eficaz que el muestreo al azar.

QUIMICA MARINA

Un enigma del calcio

Los excrementos de los peces podrían resolver un misterio que se intenta resolver desde hace años. Al morir plancton marino, los exoesqueletos, que son de carbonato de calcio, se disuelven y tornan alcalina el agua del mar. Sin embargo, en estudios de hace ya tiempo se comprobó que las aguas superficiales eran más alcalinas de lo esperable sólo con la contribución del plancton. Científicos de la Universidad de Exeter han determinado que "cálculos intestinales" de carbonato de calcio, hallados por primera vez hace 20 años en los intestinos de pejesapos podrían abarcar un porcentaje impresionante del carbonato marino. Según sus modelos informáticos, nadan en el océano entre 812.000 millones y 2 billones de kilogramos de peces óseos, que anualmente producirían unos 110.000 millones de carbonato de calcio. Tal cantidad constituye al menos entre un 3 y un 15 por ciento de la producción total de carbonato, si no alcanza hasta un 45 por ciento. Los autores conjeturan que, al elevarse la temperatura del mar y aumentar el dióxido de carbono durante este siglo, los peces podrían producir todavía más carbonato de calcio.



—Charles Q. Choi

RON CHAPPLE *Stock/Corbis (ventilador)*; CAREN BRINKEMA *(turbinas eólicas)*; CARLOS SERRAO *Getty Images (guardia de seguridad)*; SARA NADAL MIQUEL *(Costa Brava)*

Observatorio Pierre Auger

El desafío de estudiar las partículas más energéticas del universo

Cuando Victor Hess, a principios del siglo XX, descubrió un nuevo tipo de radiación proveniente del espacio, no podía ni siquiera soñar que algún día esas partículas darían lugar a una nueva rama de la astronomía. Se trataba de los rayos cósmicos, así bautizados algunos años después.

Se sabe desde hace tiempo que muchas de estas partículas, las de menor energía (o velocidad), llegan desde el Sol, formando el *viento solar.* Como son protones, uno de los componentes del núcleo de los átomos, tienen carga eléctrica, por la cual, igual que producen efectos de gran belleza —las auroras boreales y australes—, causan daños en los satélites que orbitan en torno a la Tierra y provocan interferencias en las comunicaciones.

Los rayos cósmicos de mayor energía provienen de lejanos lugares de nuestra galaxia o, incluso, de fuera de ella. Existen diferentes teorías acerca de cómo se aceleran y en qué fuentes se producen. Cuanto mayor es su energía, más difícil resulta explicar su existencia, ya que son necesarios campos magnéticos muy intensos que actúen dentro de espacios enormes para que las partículas se aceleren hasta las energías más altas. Sólo las supernovas, los núcleos galácticos activos, las estrellas de neutrones y las explosiones de rayos gamma podrían emitir esos rayos cósmicos.

Una tarea difícil

La información del lugar donde se originaron las partículas, salvo en el caso de las de energía extremadamente alta, se pierde del todo. Los campos magnéticos existentes dentro de las galaxias y en el espacio entre ellas alteran su trayectoria de forma impredecible. Sólo los rayos cósmicos de mayor energía pueden llegar hasta nuestro planeta viajando en línea recta, precisamente debido a la enorme velocidad a la que se mueven. La intensidad de los campos magnéticos a través de los que viajan no es suficiente para desviarlos; pueden señalar así directamente a su fuente de origen. Esto hace que sean fundamentales para una nueva rama de la ciencia, la astronomía de partículas.

Tradicionalmente, la astronomía utiliza la luz en sus diferentes *longitudes de onda* o energías, desde las ondas de radio hasta los rayos gamma, para obtener información acerca de lo que ocurre en el interior de los objetos que ocupan el universo. Si se pudieran utilizar partículas con el mismo fin, se obtendría información nueva o complementaria que permitiría entender mejor los procesos físicos que se producen en esos lugares remotos.

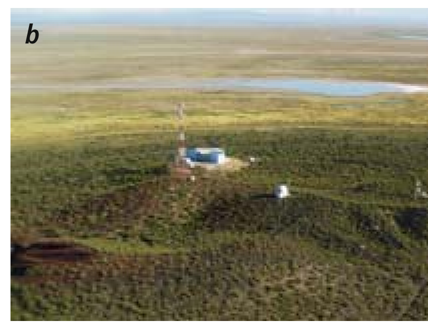
Los rayos cósmicos de mayor energía sólo pueden estudiarse indirectamente. Cuando una de estas partículas llega a las capas superiores de la atmósfera terrestre, interacciona con un núcleo de alguno de los elementos que componen el aire. La interacción produce una cascada de partículas secundarias, que, para cuando llega al suelo, se extiende sobre varias decenas de kilómetros cuadrados. Toda la energía del rayo cósmico primario se distribuye entre cientos de millones de partículas, o bien se utiliza para crearlas. Estudiando las características de la cascada —número total de partículas, su dirección de avance y el lugar dónde se produce su máximo desarrollo—, podemos deducir las propiedades del rayo cósmico primario.

Construcción del observatorio

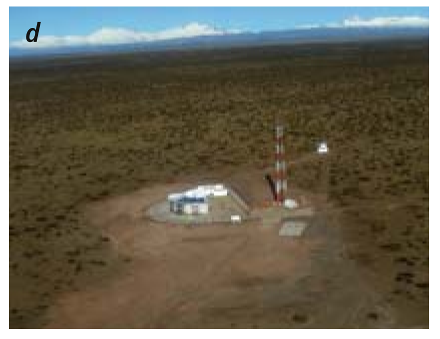
El Observatorio Pierre Auger, llamado así en honor del físico francés que descubrió, en los años treinta del siglo pasado, las cascadas de partículas secundarias, se diseñó para estudiar los rayos

OBSERVATORIO PIERRE AUGER









1. Los edificios de Coihueco (*a*), Los Leones (*b*), Los Morados (*c*) y Loma Amarilla (*d*).

cósmicos de energía extremadamente alta: del orden de 10^{20} eV (electronvolt). La energía de estas partículas cósmicas es equiparable a la que posee una pelota de tenis en un saque potente, sólo que concentrada en un objeto de un tamaño muchísimo menor.

El observatorio cubre una superficie total de 3300 km^2. Este tamaño descomunal tiene una justificación clara: los rayos cósmicos de mayor energía no abundan. Se estima que, en promedio, sólo llega a nuestro planeta uno por kilómetro cuadrado de superficie cada cien años. La única manera de que el número de eventos registrados permita obtener información útil acerca de estas partículas es cubrir esa enorme superficie con detectores.

No es sencillo encontrar un lugar con una superficie llana tan extensa, mayor que la cubierta por las ciudades más grandes del mundo (la superficie de la ciudad de Buenos Aires, por ejemplo, es unas 16 veces menor). Este fue uno de los motivos de que se eligiese Pampa Amarilla, al sur de la provincia de Mendoza, en Argentina, para emplazar el sitio sur del observatorio. Se trata de una enorme meseta, con una altura promedio cercana los 1400 m sobre el nivel del mar.

El observatorio utiliza dos técnicas diferentes para estudiar los rayos cósmicos: los detectores de fluorescencia, que observan el camino de la cascada de partículas secundarias en la atmósfera, y los de superficie, que registran el arribo de las partículas a nivel del suelo. Se dice, por lo tanto, que es un observatorio *híbrido*. En Argentina se han instalado 1600 detectores de superficie, en una parrilla triangular de 1,5 km de lado, y 24 detectores de fluorescencia, distribuidos en 4 edificios, que observan el cielo por encima de los primeros.

La construcción en sí misma fue una tarea ardua y complicada; llevó unos seis años. Desde un principio, el Pierre Auger fue pensado como un observatorio con dos ubicaciones, una en cada hemisferio de la Tierra. Dado que los objetos que pueden observarse en el cielo de cada hemisferio son diferentes, ambos sitios son necesarios y permitirán obtener información complementaria. El sitio norte se construirá cerca de la ciudad norteamericana de Lamar, en el estado de Colorado.

El objetivo de tamaña obra es determinar de qué punto del cosmos llegan esos rayos cósmicos, qué tipo de partículas los componen y, en el mejor de los casos, aprender más sobre lo que sucede en algunos lugares del universo apenas explorados.

Un destello en el cielo

Entre todas las partículas que componen la cascada secundaria destacan los electrones, que interaccionan con las moléculas de nitrógeno, muy abundante en la atmósfera terrestre, y producen *fluorescencia*. La luz ultravioleta generada marca el camino de las partículas en su ruta hacia la superficie terrestre. Así recabamos información sobre la dirección y energía del rayo cósmico que las produjo.

Los detectores de fluorescencia utilizan grandes espejos para concentrar esta luz, muy tenue, y *fotomultiplicadores* (detectores de luz muy sensibles) que la transforman en un pulso eléctrico, que se puede analizar; la información consiguiente se guarda en una computadora. Antes de llegar a los espejos, la luz atraviesa por un filtro que permite eliminar la mayor parte de la luz que no se produce por la fluorescencia del nitrógeno (es decir, que tiene otra *longitud de onda*) y que afectaría a la calidad de los datos.

Los espejos concentran la luz de fluorescencia sobre una cámara compuesta por 440 fotomultiplicadores. Se forma una imagen de la cascada, en la que cada fotomultiplicador representa un *píxel*. Analizando esta imagen, descubrimos por qué dirección avanzaban las partículas y cuántas se produjeron a diferentes alturas. La dirección de avance de la cascada es la misma de la partícula primaria.

Diferentes partículas primarias producen cascadas que tienen un máximo desarrollo (es decir, un mayor número de partículas secundarias) a diferentes alturas. Por ejemplo, una cascada originada por un protón tendrá un máximo a una altura menor que si hubiera sido producida por un núcleo de hierro. La posición del máximo puede determinarse utilizando la imagen generada por cada detector de fluorescencia. De esta manera se puede saber, estadísticamente, de qué tipo de partículas se componen los rayos cósmicos estudiados.

Cuanto más energética sea la partícula primaria, mayor número de partículas se producirán en la cascada y, por lo tanto, mayor será la cantidad de luz de fluorescencia inducida. La cantidad total de luz captada por un detector de fluorescencia permite así medir directamente la energía del rayo cósmico primario.



2. Espejo y cámara de un detector de fluorescencia.

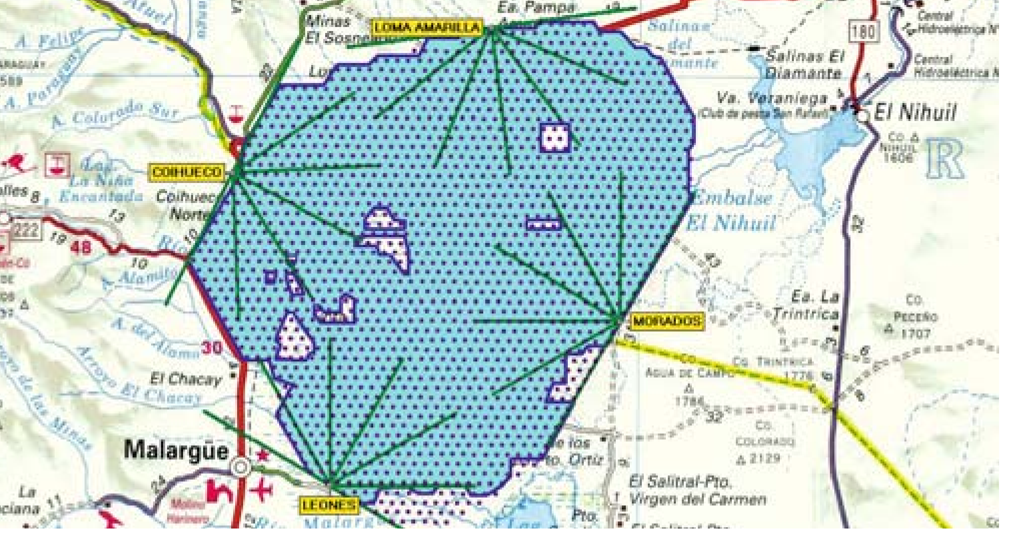
Es fundamental conocer las condiciones atmosféricas en el momento en que los detectores de fluorescencia están funcionando. Que la luz sea absorbida o dispersada (por polvo en suspensión) puede falsear los datos. El observatorio cuenta con varias instalaciones dedicadas al estudio de la atmósfera, cuyos datos sirven para compensar tales disparidades en la cantidad de luz detectada.

Los detectores de fluorescencia operan sólo en noches sin luna, lluvia o nieve, y con la menor cantidad de nubes posible. Esto representa, aproximadamente, el 15 % del tiempo total. El nivel de precipitación anual es bajo en los lugares elegidos para los observatorios sur y norte, que además poseen un cielo exento de contaminación antropogénica.

Un destello en el agua

Para detectar las partículas que llegan al nivel del suelo, se utilizan tanques fabricados en resina de polietileno que contienen, cada uno, 12.000 litros de agua destilada. Cuando una partícula dotada de carga eléctrica viaja a gran velocidad a través de un medio transparente se genera cierta cantidad de luz. Este fenómeno se denomina *efecto Cherenkov* y tiene el mismo origen que la luz azulada que se observa en las fotos de las piscinas de las centrales nucleares.

Cada detector de superficie está equipado con tres *fotomultiplicadores,* similares a los utilizados en los detectores de fluorescencia, aunque de mayor tamaño. Detectan la luz producida por las partículas secundarias en el agua y la convierten en una señal que se puede analizar y almacenar.



3. Mapa de la ubicación del Observatorio Pierre Auger en la Pampa Amarilla, Argentina. Cada punto rojo representa un detector de superficie. Se indican los cuatro edificios, cada uno con 6 detectores de fluorescencia (Los Leones, Los Morados, Loma Amarilla y Coihueco). Las líneas radiales a cada edificio representan el ángulo de cobertura de cada detector.

Puesto que los 1600 tanques están ubicados en lugares de difícil acceso, deben funcionar de forma totalmente autónoma. Utilizan paneles con células solares para cargar dos baterías, que proporcionan la energía necesaria para el funcionamiento de los componentes. Este sistema les permite tomar datos todo el tiempo, día y noche, independientemente de las condiciones climáticas.

La información de un solo detector de superficie no basta para obtener datos acerca de la cascada. Es necesario utilizarlos en *coincidencia,* es decir, combinando la información de todos los tanques que detectaron partículas dentro de un intervalo de tiempo. Además de este modo de funcionamiento, cada vez que algún detector de fluorescencia detecta una cascada, la información de su posición y orientación sirve para determinar si uno o más tanques registraron también las partículas. Esta es la base del funcionamiento *híbrido*, que mejora enormemente la calidad con la que se puede reconstruir la dirección de los rayos cósmicos.

Cada detector de superficie comunica sus datos al edificio de fluorescencia más cercano, desde donde son retransmitidos al Centro de Adquisición de Datos, en la estación central. El funcionamiento de todos los detectores se sigue por control remoto, mediante computadoras. No es necesario trasladarse hasta ninguno de ellos para acceder a los datos.

Los tanques de agua no son el único método de construir detectores de superficie. Otros observatorios, como AGASA en Japón o el *Telescope Array* de EE.UU., utilizan centelladores plásticos. La ventaja de los tanques de agua estriba en su mayor eficiencia para detectar cascadas que llegan a la superficie terrestre con ángulos mayores a 60 grados con respecto a la vertical, o incluso las que son casi horizontales.

¿Qué son y de dónde vienen?

Hay varios datos que llevan a pensar que estos rayos cósmicos de enorme energía son protones, las mismas partículas que forman el *viento* continuo que nos llega desde el Sol, pero provenientes de regiones mucho más lejanas y agitadas. Si la conjetura fuese cierta, las partículas perderían energía en su camino hacia la Tierra en virtud de diferentes procesos, relacionados con la presencia de la *radiación de fondo cósmica de microondas,* el mar de fotones que inunda el espacio, originado poco después del comienzo del universo. Sólo las partículas generadas a menos de 150 millones de años luz de nuestro planeta podrían llegar con una energía cercana a los 10^{20} eV. Esta distancia resulta pequeña con respecto al tamaño del universo visible.

En términos experimentales, ese límite para la distancia desde la que pueden llegarnos los rayos cósmicos se manifestaría en forma de una disminución brusca del número de partículas detectadas a partir de una energía determinada. Otros experimentos han registrado esa característica con anterioridad y los datos del Observatorio Auger confirman su existencia.

Los datos obtenidos hasta el momento indican que los eventos no provienen de cualquier dirección con igual probabilidad, sino de fuentes puntuales. Existe una correlación entre la dirección de varios eventos y la ubicación de núcleos galácticos activos cercanos, aunque no se puede asegurar aún que éstos sean las fuentes, debido a que el error en la determinación de la dirección de arribo de los rayos cósmicos sigue siendo excesivo.

Antes del desarrollo de los aceleradores de partículas, en los años cincuenta del siglo pasado, los rayos cósmicos constituían la única manera de estudiar las interacciones físicas en el mundo subatómico. El acelerador más poderoso de los creados, el Gran Colisionador de Hadrones, en el laboratorio europeo CERN, "sólo" alcanzará a producir interacciones entre protones a una energía aproximada de 10^{13} eV, 10 millones de veces menor que la de los rayos cósmicos estudiados por el Observatorio Pierre Auger.

Julio Rodríguez Martino
Observatorio Pierre Auger
Malagüe, Mendoza,
Argentina

Nueva gripe humana de origen porcino

¿Cuánto de nuevo?

El 24 de abril empezó a circular la noticia de casos de infección por una nueva forma de virus de la gripe de tipo A en México, aunque probablemente el virus llevaba semanas circulando entre humanos. Como era previsible, dado el gran potencial pandémico del virus de la gripe humana, la infección se extendió en pocos días a varios países de cuatro continentes; el número de casos aumentó a centenares, hasta alcanzar millares en el momento de preparar este artículo para su publicación.

Desde hace años se ha venido advirtiendo del peligro de una nueva pande-

mia de gripe por razones históricas obvias: al menos desde el siglo XVIII se han dado periódicamente epidemias de gripe, incluida la terrible gripe mal llamada española de 1918, que causó entre 40 y 50 millones de muertos [*véase* "El virus de la gripe de 1918", por J. K. Taubenberger, Ann H. Reid y Thomas G. Fanning, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo 2005]. Pandemias más recientes fueron la gripe asiática de 1957, la de Hong Kong de 1968 y la gripe rusa de 1977.

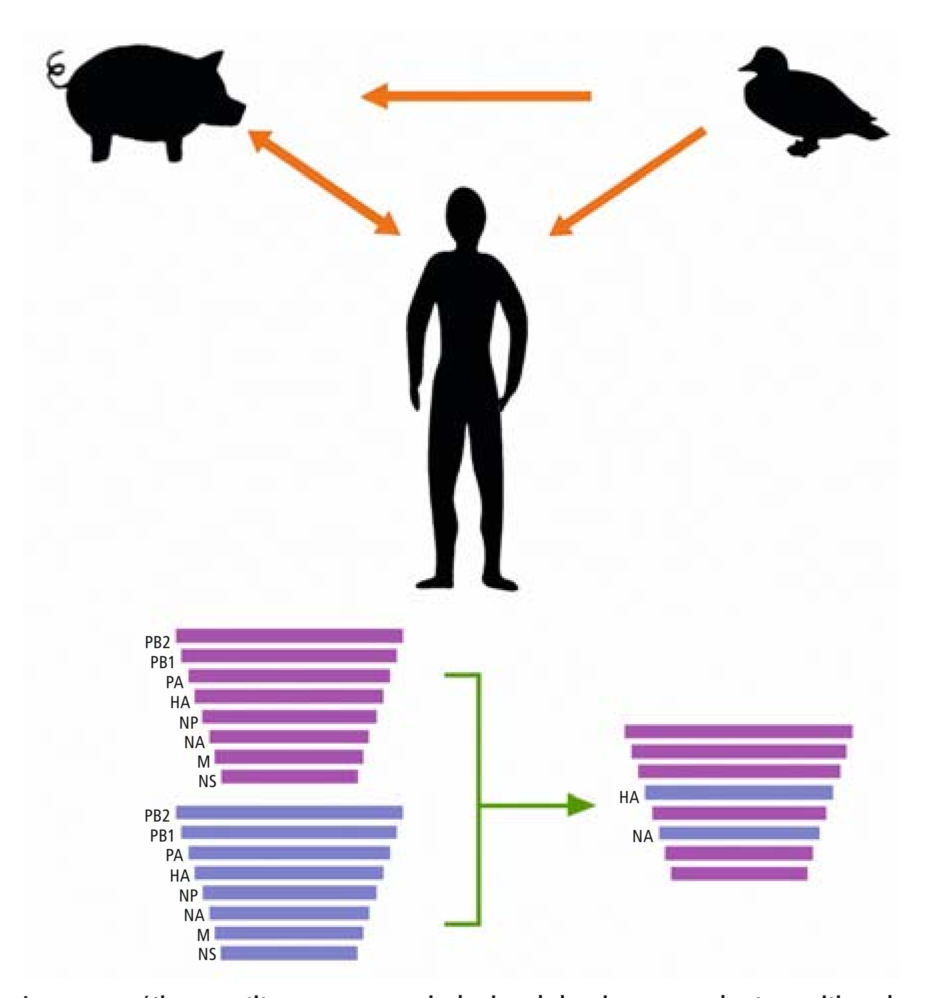
Reemergencia periódica

Hay razones virológicas, ecológicas y ambientales para sospechar fundadamente que el virus de la gripe reemergerá periódicamente en forma de patógeno humano. En primer lugar, el virus explota un amplio abanico de mecanismos moleculares para su adaptación a ambientes biológicos cambiantes. Su información genética no está contenida en una sola molécula de ácido ribonucleico (ARN), sino que se halla dividida en ocho segmentos de ARN: PB2, PB1, PA, HA, NA, NP, M y NS. Cada uno de ellos codifica una o más proteínas implicadas en la replicación vírica y en la interacción del virus con el hospedador.

El ARN vírico puede evolucionar rápidamente por mutación (cambios puntuales en los nucleótidos que constituyen el ARN genómico) y por recombinación (formación de un gen mosaico a partir de genes parentales distintos). Además, los segmentos del genoma pueden intercambiarse entre virus distintos cuando éstos coinfectan la misma célula. Se han asociado los reordenamientos de segmentos provenientes de virus de animales y de virus humanos a la emergencia de virus pandémicos.

La capacidad del virus para infectar y ser transmitido entre humanos, su nivel de virulencia y la respuesta inmunitaria que provoca en los individuos infectados dependen de las interacciones entre proteínas víricas, así como de las interacciones entre proteínas víricas y del hospedador.

Las proteínas más relevantes para la inducción de anticuerpos que pueden contribuir a la eliminación del virus y a la protección frente a infecciones posteriores son la hemaglutinina (HA) y la neuraminidasa (NA). Estas dos glicoproteínas de la superficie vírica determinan el comportamiento antigénico del virus y definen el subtipo. Se han descrito 16



Las aves acuáticas constituyen un reservorio de virus de la gripe que pueden transmitirse al hombre y a otros mamíferos. Al coinfectar dos virus distintos la misma célula pueden producirse reordenamientos génicos (*abajo*). Los virus evolucionan continuamente mediante reordenamientos génicos y mutación, originando nuevos virus con propiedades altamente impredecibles.

JOSE BELIO

subtipos de HA (de H1 a H16) y 9 subtipos de NA (de N1 a N9). Cuando los reordenamientos génicos implican a los genes HA y NA se dice que el virus ha sufrido un "salto" antigénico; cuando la variación de HA y NA se debe a una mutación se considera que el virus experimenta una "deriva" genética.

La capacidad infectiva del virus, su transmisibilidad y nivel de virulencia dependen de varios factores que atañen al virus y al hospedador. Las proteínas víricas HA, PB2 (componente de la polimerasa encargada de copiar el ARN) y NS1 (proteína expresada por el gen *NS*) constituyen factores de patogenia. HA incluye secuencias de reconocimiento del receptor celular y sufre un procesamiento necesario para que el virus pueda penetrar en la célula. El procesamiento de HA depende de una secuencia de aminoácidos que determina la susceptibilidad de la proteína a enzimas celulares que catalizan la rotura. NS1 es un antagonista del interferón, uno de los determinantes celulares de la resistencia al virus. La actividad de NS1 varía en función de su secuencia aminoacídica. Lo mismo ocurre con PB2, una proteína que reconoce ARN celulares y que altera la eficiencia de replicación del virus. Los factores de patogenia se hallan, pues, sometidos a variación por deriva genética de los genes correspondientes.

Esta breve descripción ilustra que el virus de la gripe explota varios mecanismos moleculares para reemerger periódicamente en forma de patógeno, con un nivel de virulencia impredecible. La adaptabilidad es sólo uno entre un conjunto de factores que intervienen en la emergencia de virus de la gripe o de cualquier patógeno nuevo para la especie humana. Son múltiples los factores sociológicos, ecológicos y ambientales que

contribuyen a la emergencia y reemergencia de enfermedades víricas.

Reservorios víricos

Una de las reservas más importantes de virus de la gripe se halla en el tracto intestinal de aves acuáticas a las que el virus no suele causar enfermedad. Los esfuerzos para prevenir una posible nueva pandemia se dirigían sobre todo a Asia, donde se habían descrito saltos de virus de aves silvestres a aves domésticas y de éstas a humanos.

El virus de la gripe puede infectar también a un número considerable de mamíferos, sobre todo al cerdo y al caballo. Por estudios anteriores se sabe que el cerdo puede operar a modo de "reactor" biológico, en donde virus de procedencia distinta pueden intercambiar sus segmentos genómicos. Aunque los reordenamientos génicos pueden ocurrir en cualquier animal al que lleguen virus de procedencia distinta, suele considerarse que las aves son las donadoras de segmentos nuevos y los mamíferos los principales vehículos de generación de virus nuevos.

El virus que emergió en México tiene una constelación de segmentos genómicos que parecen provenir de virus humanos (PB2), virus de aves (PB1 y PA) y virus de cerdo (HA, NP, NA, M y NS). Se trata de un virus de subtipo H1N1, cuyos genes HA y NA parecen haber divergido de forma notable a partir de otros virus H1N1 anteriores.

La mayoría de los factores que influyen en la emergencia de enfermedades víricas lo hacen mediante la alteración del tráfico de virus y de los vectores que los transportan (animales, insectos, objetos). Ello puede facilitar el contacto con el hombre de virus que tienen el potencial de convertirse en patógenos para humanos. Por ejemplo, el cambio climático altera hábitos migratorios de las aves, lo que expone a nuevos ambientes los virus que éstas transportan. Las explotaciones ganaderas y los grandes mercados o ferias que agrupan animales vivos aumentan la probabilidad de transmisión de virus entre animales o de animales a humanos. Dado que los continuos cambios genéticos de los virus se rigen por el azar, cuantos más contactos se den entre vectores y hospedadores potenciales, mayor es la probabilidad de que una variante vírica determinada encuentre un hospedador en el que pueda causar una infección que de lugar a un virus transmisible. En esta gran ruleta de variación, seguida de competición y selección (principios básicos de la evolución darwinista), las aglomeraciones urbanas, las rápidas migraciones humanas entre continentes, las explotaciones ganaderas y el comercio de animales y sus productos favorecen la emergencia de nuevas enfermedades infecciosas.

Cuestiones pendientes

La caracterización del nuevo virus que se está realizando en la actualidad debería dar respuesta a varias preguntas clave relacionadas con la nueva pandemia: ¿Cuál es la historia evolutiva de los segmentos de ARN presentes en el nuevo virus? ¿En qué se diferencia este virus H1N1 de otros H1N1 anteriores? ¿Cuáles son los determinantes de su virulencia y de su transmisibilidad entre humanos? ¿Puede cambiar su virulencia a medida que circule entre humanos? ¿Pueden generarse virus resistentes a los antivirales que se están empleando para el tratamiento de la infección? Al haberse iniciado la infección en el centro de América en lugar de Asia, como se esperaba, ¿deben reconsiderarse los sistemas de seguimiento que operaban hasta la fecha?

Estas y otras cuestiones de sumo interés para la virología y la salud pública van indudablemente a llenar muchas páginas de revistas científicas en los próximos meses —aunque la aparición en sí de este nuevo virus pandémico tiene poco de nuevo e inesperado—. Nuevas enfermedades víricas humanas han emergido al ritmo de una por año durante los últimos decenios. La duda no es si habrá nuevas enfermedades emergentes humanas, sino cuándo y dónde aparecerán y qué tipo de virus las provocarán.

Esteban Domingo
Centro de Biología Molecular Severo Ochoa (CSIC-UAM), Universidad Autónoma de Madrid y Centro de Investigación Biomédica en Red de Enfermedades Hepáticas y Digestivas (CIBERehd)

Enfriamiento de estrellas de neutrones

El estudio de estos objetos nos permite obtener información sobre el comportamiento de la materia en condiciones extremas y no reproducibles en la Tierra

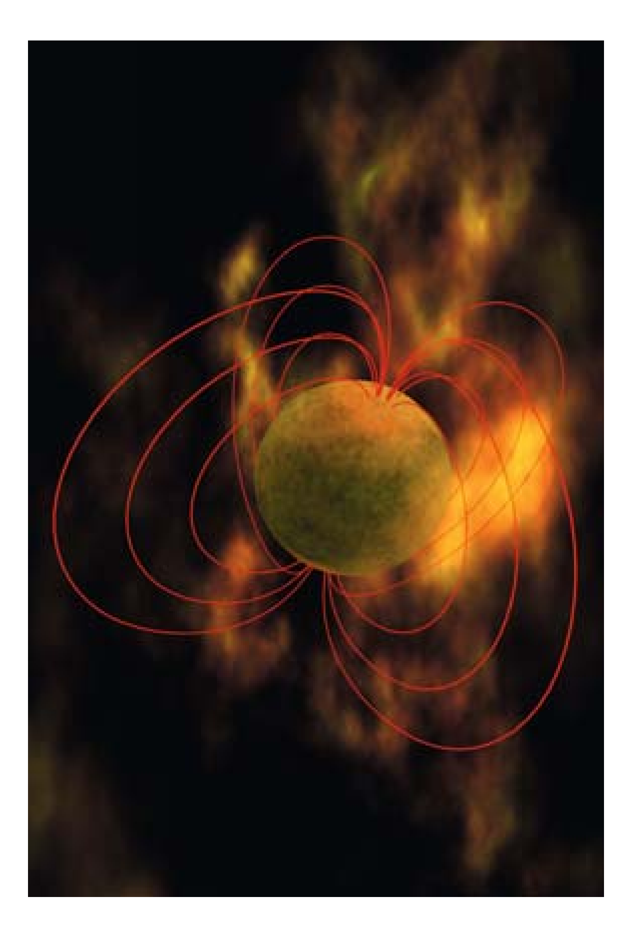
Poco después del descubrimiento del neutrón surgieron las primeras hipótesis sobre la existencia de estrellas formadas principalmente por esas partículas. En el año 1934, Walter Baade, del Observatorio del monte Wilson, y Fritz Zwicky, del Instituto de Tecnología de California (Caltech), acuñaron la expresión *estrella de neutrones* y propusieron además que se formaría en las explosiones de supernovas.

Ahora sabemos que las explosiones de supernovas tienen lugar al final de la vida de estrellas con una masa superior a unas ocho veces la solar, que expulsan una gran parte de la masa de la estrella y dejan en su interior un objeto muy denso, muy caliente y rico en neutrinos, que constituye el germen de una estrella de neutrones. Por esa razón, al objeto en cuestión se le denomina *protoestrella de neutrones*. Transcurridas unas decenas de segundos, el objeto se enfría lo suficiente para que resulte transparente a los neutrinos producidos en su interior: se ha formado una estrella de neutrones.

La masa típica de las estrellas de neutrones observadas es alrededor de una vez y media la masa del Sol. Los modelos teóricos de estrellas de neutrones nos indican que la densidad en el centro de estas estrellas supera la densidad de los núcleos atómicos; se sitúa en torno a quinientos millones de toneladas por centímetro cúbico, aunque este valor depende de la masa de la estrella y de las propiedades de la materia a tan altas densidades. De estos modelos se deduce también que los radios típicos de las estrellas de neutrones se encuentran entre los 10 y los 15 kilómetros. Son, por tanto, los objetos más compactos del

universo, si exceptuamos los agujeros negros.

A partir de su formación, la evolución de una estrella de neutrones aislada consiste en su enfriamiento, debido a la emisión de neutrinos, que se producen principalmente en la zona más interna de la estrella, y de fotones, emitidos desde las capas superficiales. Estos dos procesos conducen a la disminución gradual de la temperatura de la estrella, a un ritmo que puede variar significativamente dependiendo de las condiciones físicas de la materia de que está formada. El interés del estudio del enfriamiento de las estrellas de neutrones radica en la posibilidad de obtener información sobre el comportamiento de la materia en condiciones no reproducibles en laboratorios terrestres, mediante la comparación de los modelos teóricos de enfriamiento con los datos observados de temperatura y edad.



Los magnetares son estrellas de neutrones con campos magnéticos especialmente intensos. La disipación de la energía magnética por la que se calientan estos astros parece caldear también estrellas de neutrones con campos menos intensos.

La determinación de la temperatura de las estrellas de neutrones se realiza mediante la detección y análisis de la radiación térmica que emiten. Debido a las altas temperaturas de sus capas superficiales, del orden de un millón de grados, la radiación térmica presenta el máximo de emisión en la zona de rayos X y, por tanto, es necesario utilizar satélites, ya que nuestra atmósfera es opaca a esa radiación. Actualmente hay varios satélites operativos (*Chandra*, *XMM-Newton*, *Suzaku*, etcétera) y se ha podido determinar la temperatura de una veintena de estrellas de neutrones; en algunos casos sólo disponemos de cotas superiores y no de valores precisos. Futuros satélites, como *AstroSat* o los proyectados *XEUS* y *Cons-X,* serán cruciales para mejorar nuestras mediciones de la temperatura.

En cuanto a la determinación de la edad de una estrella de neutrones, las dificultades son todavía mayores. Excepto en los casos en que hay registros históricos sobre la supernova que la originó, como es el caso de la estrella de neutrones de la nebulosa del Cangrejo, cuya explosión supernova se observó en el año 1054, la determinación de la edad suele basarse en el aumento del período de rotación de la estrella. Las estrellas de neutrones nacen con un campo magnético intenso y un período de rotación pequeño, que va aumentando con el tiempo debido a que la energía rotacional, a través del intenso campo magnético, se transforma en ondas electromagnéticas o acelera partículas cargadas. La medición de la variación del período proporciona una estimación de la edad de la estrella.

Los modelos teóricos nos indican que el enfriamiento de las estrellas de neutrones se desarrolla en dos fases. La primera fase corresponde a un enfriamiento dominado por la emisión de neutrinos; el ritmo y la duración de esta fase dependen significativamente de la masa de la estrella y de las características de la interacción nuclear entre las partículas a tan altas densidades. La posible presencia de partículas *exóticas,* como hiperones, condensados de kaones o de piones, o quarks desconfinados —en la materia corriente, los quarks están confinados en los protones y neutrones de los núcleos atómicos—, aceleraría considerablemente el ritmo de enfriamiento (*enfriamiento rápido*) de esta primera fase con respecto al caso de que no haya este tipo de partículas (*enfriamiento estándar*). Conforme a esta segunda hipótesis, la fase puede durar unos cien mil años: las observaciones parecen respaldarla.

En la evolución posterior, la emisión de fotones es la que gobierna el enfriamiento, que transcurre a un ritmo más lento (segunda fase).

En los últimos años se ha argumentado que las estrellas de neutrones con campos magnéticos especialmente elevados (mil billones de veces el campo magnético terrestre), los *magnetares* (del inglés *magne*tic s*tars*), pueden transformar la energía almacenada en el campo magnético en calor por medio del efecto Joule. Al igual que en el filamento de una lámpara incandescente, las corrientes eléctricas que generan el campo magnético de la estrella encuentran cierta resistencia y se disipan en forma de calor. De esta forma se puede mantener la estrella caliente durante más tiempo, ya que este proceso compensaría, en parte, la pérdida de energía por emisión de neutrinos y fotones. Ese efecto ayudaría a explicar la temperatura alta, con relación a la edad, que se observa en este tipo de estrellas de neutrones. Recientemente, los autores, en colaboración con Bennett Link, de la Universidad de Montana, Ulrich Geppert, del Centro Aeroespacial Alemán, y Deborah Aguilera, del Laboratorio Tandar en Buenos Aires, han encontrado una estrecha correlación entre la temperatura y la intensidad del campo magnético de una decena de estrellas de neutrones, lo que sugiere que la disipación de la energía magnética también opera eficientemente en estrellas de neutrones con campos magnéticos no tan elevados.

Juan Antonio Miralles
José Antonio Pons
Departamento de Física Aplicada,
Universidad de Alicante

ENERGIA OSCURA O VACIO COSMICO

Las observaciones que llevaron a deducir la existencia de la energía oscura podrían tener otra explicación: que nuestra galaxia estuviera en el centro de un gigantesco vacío cósmico

Timothy Clifton y Pedro G. Ferreira

En ciencia, las mayores revoluciones vienen a menudo provocadas por sutiles discrepancias. En el siglo XVI, sobre la base de lo que muchos de sus contemporáneos consideraban esotéricas minucias de los movimientos celestes, Copérnico propuso que la Tierra no ocupaba el centro del universo. En nuestra propia época, empezó otra revolución hace 11 años, con el descubrimiento de la aceleración de la expansión del universo. Una pequeña desviación en el brillo de las explosiones de estrellas llevó a concluir que no se tenía la menor idea de qué consiste el 70 por ciento del cosmos. Todo lo que se podía decir es que el espacio está lleno de una sustancia diferente de cualquier otra, una sustancia que empuja la expansión del universo en lugar de frenarla. Esa sustancia recibe el nombre de energía oscura.

Ha transcurrido ya más de un decenio y la existencia de la energía oscura sigue siendo tan desconcertante, que algunos cosmólogos están revisando los postulados fundamentales que les llevaron a deducir su existencia. Uno de esos postulados brota del principio copernicano que dicta que la Tierra no se halla en una posición central, o especial, en el universo. Si se descarta este principio básico, se desprende una explicación sorprendentemente diferente de las observaciones.

Estamos muy acostumbrados a la idea de que nuestro planeta no es más que una pequeña mota que orbita alrededor de una estrella típica, en algún lugar cerca del borde de una galaxia común. En medio de un universo poblado por miles de millones de galaxias que se extienden por nuestro horizonte cósmico, damos por cierto que no hay nada singular o especial en nuestra ubicación. Pero, ¿cuál es la prueba de esta humildad cósmica? ¿Y cómo podríamos saber si estamos en un lugar especial? Se suelen pasar por alto estas cuestiones, suponiendo que es tan obvia nuestra insignificancia como para que haya que darle más vueltas. Que estemos en un lugar especial del universo es, para muchos, impensable. Sin embargo, eso es exactamente lo que algunos pequeños grupos de físicos han comenzado a tomar en consideración en los últimos años.

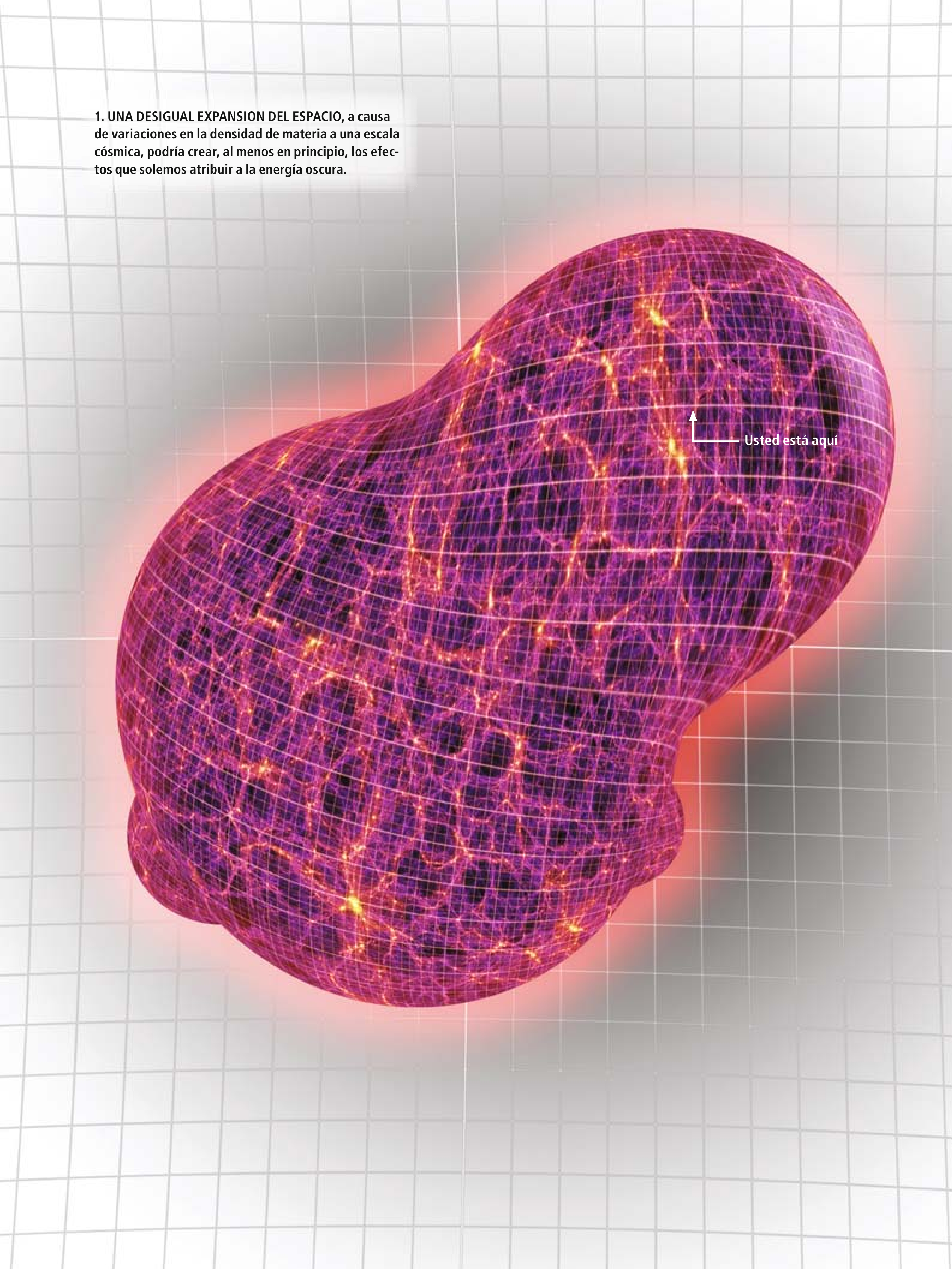
Por paradójico que parezca, la convicción de nuestra insignificancia ha proporcionado a los cosmólogos gran poder explicativo. Nos ha permitido extrapolar lo que vemos en nuestro propio entorno cósmico al universo en general. Se han hecho enormes esfuerzos para construir modelos del universo basados en el principio cosmológico, una generalización del principio copernicano que señala que, en cualquier momento, todos los puntos y direcciones del espacio parecen iguales. Combinado con nuestra moderna concepción del espacio, el tiempo y la materia, el principio cosmológico implica que el espacio se está expandiendo y enfriando y está poblado por reliquias de su caliente comienzo. Todas estas predicciones han sido confirmadas por las observaciones.

Así, la luz de las galaxias distantes es más roja que la procedente de galaxias cercanas.

CONCEPTOS BASICOS

- El universo se expande a un ritmo acelerado, lo que implica la existencia de una extraña nueva forma de energía, la energía oscura. El problema reside en que desconocemos la naturaleza de tal energía.
- Quizá no sea necesario recurrir a formas exóticas de energía. Si viviésemos en una región del espacio más vacía que la media, el ritmo de la expansión cósmica variaría con la posición, lo que podría confundirse con una variación en el tiempo, una aceleración.
- La mayoría de los cosmólogos cree que es muy poco probable la existencia del vacío relativo gigantesco que se necesitaría, pero también lo es la energía oscura. Las observaciones de los próximos años sentenciarán entre las dos posibilidades.

DON DIXON



1. UNA DESIGUAL EXPANSION DEL ESPACIO, a causa de variaciones en la densidad de materia a una escala cósmica, podría crear, al menos en principio, los efectos que solemos atribuir a la energía oscura.

Este fenómeno, el desplazamiento hacia el rojo, tiene una clara explicación: la expansión del universo estira las ondas de luz. Además, los detectores de microondas revelan un fondo de radiación, casi perfectamente uniforme, emitida en los primerísimos instantes del mundo: el fondo cósmico de microondas, una reliquia de la bola de fuego primordial. Es justo decir que estos éxitos derivan, en parte al menos, de nuestra propia humildad: cuanta menos importancia nos demos, más podremos decir sobre el universo.

La oscuridad se acerca

Entonces, ¿por qué pilotamos el barco hacia las rocas? Si el principio cosmológico es tan exitoso, ¿por qué lo cuestionamos? El problema deriva de algunas observaciones astronómicas. Desde hace unos diez años sabemos que, para un determinado corrimiento hacia el rojo, las explosiones de supernovas remotas parecen más tenues de lo esperado. El corrimiento hacia el rojo mide cuánto se ha expandido el espacio. Al medir cuánto se ha desplazado hacia el rojo la luz de supernovas distantes, se puede inferir cuánto más pequeño era el universo en el momento de la explosión, en comparación con su tamaño actual. A mayor corrimiento hacia el rojo, menor tamaño del universo cuando se produjo la supernova y, por tanto, mayor expansión del universo entre entonces y ahora.

La luminosidad observada de una supernova proporciona una medida de su distancia, que a su vez pone de manifiesto cuánto tiempo ha transcurrido desde que se produjo. Si una supernova con un corrimiento determinado hacia el rojo parece más tenue de lo esperado, deberá estar más lejos de lo que se pensaba. Su luz ha tardado más en llegarnos y, por tanto, el universo debe haber tardado más tiempo en crecer hasta su tamaño actual. En consecuencia, el ritmo de expansión del universo debe haber sido más lento en el pasado de lo que se creía. Y, en efecto, la debilidad de las supernovas distantes da a entender que la expansión del universo se ha acelerado hasta alcanzar su actual ritmo de expansión [*véase* "Exploración del espacio-tiempo mediante supernovas", por Craig J. Hogan, Robert P. Kirshner y Nicholas B. Suntzeff; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1999].

Esta expansión acelerada fue la gran sorpresa que provocó la actual revolución en la cosmología. La materia del universo debería afectar a la estructura del espaciotiempo frenando la expansión, pero los datos de las supernovas indican lo contrario. Si se acepta el principio cosmológico y se supone que esta aceleración ocurre en todas partes, se llega a la conclusión de que el universo ha de estar impregnado de una exótica forma de energía, la energía oscura, que ejerce una fuerza de repulsión.

Nada que corresponda a la descripción de la energía oscura aparece en el modelo estándar de las partículas y fuerzas fundamentales. Es una sustancia que aún no se ha medido directamente, que tiene propiedades diferentes de las de cualquier cosa que hayamos visto nunca y una densidad de energía unas 10^{120} veces menor de lo que hubiéramos podido esperar ingenuamente. Los físicos tienen algunas ideas acerca de lo que podría ser, pero no pasan de especulativas [*véase* "El universo y su quintaesencia", por Jeremiah P. Ostriker y Paul J. Steinhardt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2001]. En resumen, vivimos en la ignorancia en lo que se refiere a la energía oscura. Se está trabajando en una serie de ambiciosas y costosas misiones terrestres y espaciales para encontrar y caracterizar la energía oscura, sea lo que sea. Para muchos, representa el reto principal que afronta la cosmología moderna.

Un universo inhomogéneo

Algunos están reconsiderando el razonamiento que les condujo a algo tan extraño, tan improbable. Una de las hipótesis sometidas a criba es la de que vivimos en una parte representativa del universo. Si abandonáramos el principio cosmológico, ¿podrían explicarse de otra forma los hallazgos que nos han llevado a pensar en la energía oscura?

En cosmología solemos hablar de la expansión del universo en su conjunto, a la manera del globo que se va hinchando. Hablamos de lo grande que se hace, no de cuánto se hincha cada parte. Pero muchos se las habrán visto con globos que se inflan de manera desigual: un anillo crece rápidamente y el extremo tarda un poco en darle alcance. En una concepción del universo que abandone el principio cosmológico, el espacio también se expandirá de manera desigual. Surgirá una imagen más compleja del cosmos.

Así ocurre en el tipo de universo imaginado por George Ellis, Charles Hellaby y Nazeem Mustapha, de la Universidad de Ciudad del Cabo. Marie-Noëlle Célérier, del Observatorio de París-Meudon, en Francia, desarrolló después la idea. Supongamos que el ritmo de expansión se está frenando en todas partes, ya que la materia domina el espaciotiempo y lo retarda. Supongamos, además, que vivimos en un colosal vacío cósmico, no porque se trate de una región completamente vacía, sino porque en ella la densidad media de la materia es sólo la mitad, o tal vez un tercio, de la densidad en otros lugares.

Cuanto más vacía se encuentre una región de espacio, menos materia contendrá para fre-



ESCUELA POLACA/BRIDGEMAN BIBLIOTECA DE ARTE/GETTY IMAGES (*Copérnico*)

EL LEGADO DE COPERNICO

El principio copernicano establece que la Tierra no ocupa un lugar especial en el universo. El universo tiene una densidad uniforme (homogeneidad) y parece el mismo en todas las direcciones (isotropía). Aunque potente, el principio sólo se aplica a escalas mucho mayores que una galaxia: un cosmos completamente uniforme sería una fina papilla de átomos, en vez de una colección de galaxias. Además, el principio se aplica en el espacio, no en el tiempo. Vivimos en una época especial, pasado el tiempo suficiente desde la gran explosión para que se haya podido formar vida compleja, pero no tanto como para que todas las estrellas hayan muerto. Se suele asociar el nombre de Copérnico al derrocamiento de la humanidad de cualquier posición de importancia. Mas, según Dennis Danielson, de la Universidad de la Columbia Británica, aunque los europeos precopernicanos colocaban la Tierra en el centro del universo, no consideraban el centro como una posición de importancia, sino todo lo contrario; como dijo Galileo, era "el sumidero donde se recoge la suciedad y lo efímero del universo".

Tres maneras de expandirse un universo

Se ha descubierto que las explosiones de supernovas remotas son más tenues de lo esperado. Para ver qué dice este descubrimiento acerca de la expansión cósmica, consideremos una región del espacio donde se encuentren una supernova y nuestra galaxia, la Vía Láctea. Con el tiempo, esta región crece a medida que el espacio se extiende. La supernova estalla cuando el universo tiene aproximadamente la mitad de su tamaño actual (lo que se producirá en momentos diferentes, dependiendo de que la expansión se esté desacelerando o acelerando). La luz de la explosión se dispersa y, finalmente, llega hasta nosotros, en las afueras de la Vía Láctea.



LA ANTIGUA CREENCIA: LA EXPANSION SE RALENTIZA

Antes de 1998, la mayoría de los cosmólogos suponía que la expansión cósmica se frenaba con el tiempo. A cada incremento temporal, la región del espacio aumenta en tamaño, pero éste se multiplica por un factor decreciente. Basaban sus expectativas en torno al brillo de las supernovas en este supuesto.



HIPOTESIS 1: LA EXPANSION SE ESTA ACELERANDO

Conforme a la habitual interpretación de las observaciones de supernovas, el ritmo de la expansión cósmica era menos antes. En consecuencia, el universo ha tardado más tiempo en crecer hasta su tamaño actual y la luz de las supernovas ha tenido más tiempo para difundirse, de manera que nos parecen más tenues. Para impulsar esta aceleración se requiere la energía oscura.



HIPOTESIS 2: EL UNIVERSO ES INHOMOGENEO

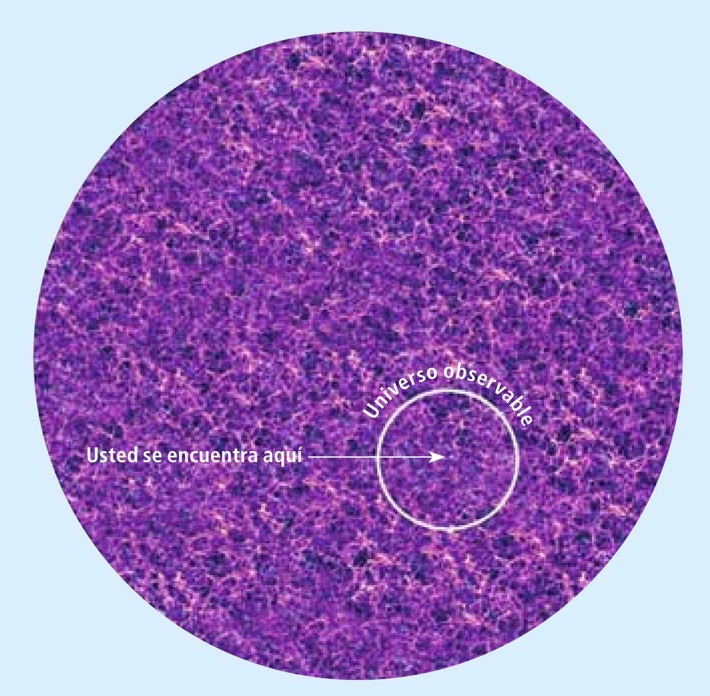
O tal vez la expansión está desacelerándose, pero a ritmos diferentes en distintos lugares. Si nuestra vecindad está más vacía que otras áreas, es decir, tiene menos materia para retardar la expansión, la expansión se desacelera en ella menos rápidamente.

A medida que la luz de una supernova se dispersa, entra en zonas de expansión cada vez más rápida, lo que tiene el mismo efecto que la aceleración cósmica, pero sin ninguna necesidad de energía oscura.

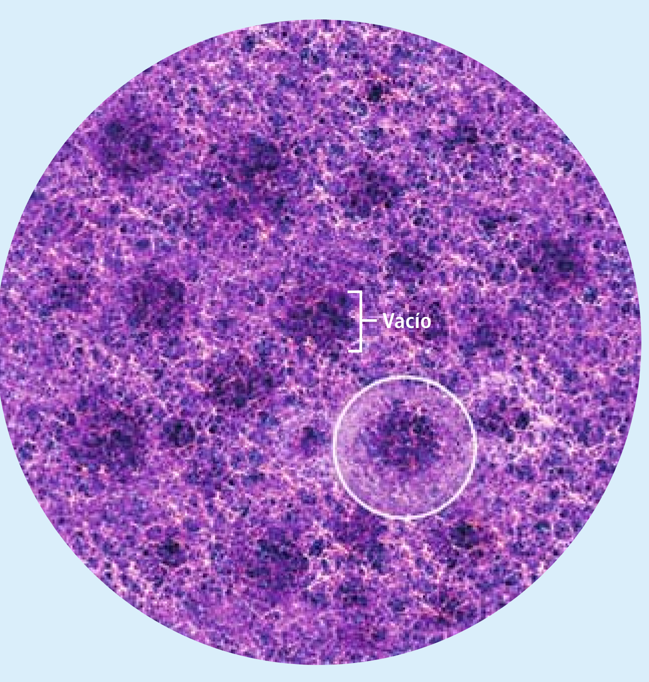
DON DIXON

Un lugar especial para nosotros

En su serie de novelas "Hitchhiker's Guide to the Galaxy", Douglas Adams imagina un dispositivo de tortura que vuelve loca a la gente mostrándoles la total insignificancia de su lugar en el universo. Una potencial víctima surge ilesa porque resulta que el universo realmente gira a su alrededor. La vida imita el arte: diversos cosmólogos están investigando si nuestro planeta realmente tiene un lugar especial en el mundo.



UNIVERSO HOMOGENEO: NUESTRA SITUACION ES TIPICA
En la concepción estándar, las galaxias se disponen en forma de tela de araña, pero el espacio global es muy parecido en todas partes y la posición de la Tierra no tiene nada especial.



UNIVERSO INHOMOGENEO: NUESTRA SITUACION ES ESPECIAL
La densidad de la materia podría variar a grandes escalas, y la Tierra podría estar en, o cerca, del centro de una región relativamente menos densa, un vacío.

DON DIXON

nar la expansión del espacio; en consecuencia, el ritmo local de expansión será allí más rápido que en otros lugares. El ritmo de expansión será mayor en el centro del vacío y disminuirá hacia el borde, donde la mayor densidad exterior se hará ya sentir. En cualquier momento dado, diferentes partes del espacio se expandirán a ritmos diferentes, como globos inflados de manera desigual.

Imaginemos ahora que estallan supernovas en diferentes partes de este universo inhomogéneo; unas cerca del centro del vacío, otras más cerca del borde y otras aún fuera del mismo. Si una supernova estalla más lejos del centro del vacío de lo que nos encontramos nosotros, el espacio se expandirá más deprisa en nuestra vecindad que donde se halle la supernova. En su camino hacia nosotros, la luz de la supernova atravesará regiones que se expanden a ritmos cada vez más rápidos. Cada región estirará la luz una cierta cantidad; el efecto acumulativo producirá el corrimiento al rojo que observaremos. La luz que viaje una distancia determinada se desplazará hacia el rojo menos que si el universo entero se expandiera a nuestro ritmo local. Por el contrario, para sufrir un mismo corrimiento al rojo, la luz tendrá que atravesar en ese universo una distancia mayor que en un mundo que se expandiese de manera uniforme: la supernova tendría que estar más lejos y, por tanto, parecer más tenue.

Otra forma de decirlo: una variación del ritmo de expansión con la posición equivale a una variación en el tiempo. Podemos así explicar las inesperadas observaciones de supernovas, sin invocar la energía oscura. Para que este tipo de explicación alternativa funcione, tendríamos que vivir en un vacío de proporciones verdaderamente cósmicas. Las observaciones de supernovas se extienden a miles de millones de años luz, una parte muy considerable del universo observable. El vacío tendría que ser de tamaño similar.

Una posibilidad muy remota

Entonces, ¿hasta qué punto sería raro este vacío cósmico? A primera vista, lo sería mucho. Parece incompatible con el fondo de microondas cósmico, que sólo se desvía de la uniformidad perfecta en una parte en 100.000, por no hablar de la aparente homogeneidad de la distribución de galaxias [*véase* "Los planos de la creación", por Michael A. Strauss; Investigación y Ciencia, abril de 2004]. En una inspección más cercana, sin embargo, esta razón no resulta tan concluyente.

La uniformidad de la radiación de fondo se limita a exigir que el universo parezca el

mismo en todas las direcciones. Si un vacío es aproximadamente esférico y si estamos razonablemente cerca de su centro, lo observado no contradirá necesariamente ese criterio. Además, el fondo de microondas cósmico tiene algunas características anómalas que cabría, en principio, atribuir a la falta de homogeneidad a gran escala (*véase el recuadro* "Rendirse al vacío").

En cuanto a la distribución de galaxias, las observaciones no llegan lo bastante lejos para descartar que haya un vacío de un tamaño tal que imite el efecto de la energía oscura; identifican vacíos más pequeños, filamentos de materia y otras estructuras de cientos de millones de años luz de tamaño, pero el supuesto vacío sería un orden de magnitud mayor. Un animado debate está ahora en marcha acerca de si los censos de galaxias corroboran el principio cosmológico. Un análisis reciente, liderado por David Hogg, indica que las mayores estructuras en el universo tienen alrededor de unos 200 millones de años luz de tamaño; a escalas mayores, la materia parece distribuida uniformemente, de conformidad con el principio. Pero Francesco Sylos Labini, del Centro Enrico Fermi de Roma, y sus colaboradores sostienen que las mayores estructuras descubiertas hasta la fecha están limitadas sólo por el tamaño de los censos galácticos que las han encontrado. Estructuras aún más grandes podrían extenderse más allá del alcance de las observaciones.

Pensemos en el mapa de una zona de diez por diez kilómetros cruzada de lado a lado por una carretera. Sería un error concluir que la carretera más larga posible tendría 10 kilómetros de largo. Para determinar la longitud de la carretera más larga se necesita un mapa que muestre claramente los puntos finales de todas las carreteras, de manera que se sepa toda su extensión. Del mismo modo, para probar el principio cosmológico se necesita un censo de galaxias que abarque más que las mayores estructuras del universo. Se debate si los rastreos realizados son o no suficientemente extensos.

A los teóricos les cuesta también admitir un vacío colosal. Todas las pruebas disponibles sugieren que las galaxias y las macroestructuras, como los filamentos y los vacíos, crecieron a partir de semillas cuánticas microscópicas, que la expansión cósmica amplió hasta proporciones astronómicas. La teoría cosmológica establece predicciones sólidas sobre el número de estructuras que deben existir de un determinado tamaño. Cuanto mayor sea una estructura, mayor también será su rareza. La probabilidad de un vacío lo suficientemente grande como para imitar la energía oscura es menor que una parte en 10^{100}. Los vacíos gigantes pueden existir, pero la posibilidad de que encontremos uno en nuestro universo observable parece pequeña.

Sin embargo, existe una posible escapatoria. A inicios de los años noventa, uno de los autores del que ahora es el modelo estándar del universo primitivo, Andrei Linde, y sus colaboradores demostraron que, aunque los vacíos gigantes son raros, se expanden más deprisa al principio y llegan a dominar el volumen del universo. La probabilidad de que los observadores se encuentren ellos mismos en una estructura de ese tipo puede, después de todo, no ser tan pequeña. Este resultado muestra que el principio cosmológico (que afirma que no vivimos en un lugar especial) no siempre coincide con el principio de mediocridad (que somos observadores típicos). Cabe, a la vez, ser típico y vivir en un lugar especial.

Comprobación del vacío

¿Qué observaciones podrían decirnos si la expansión del universo está impulsada por la energía oscura o si vivimos en el centro de un vacío gigante, un genuino lugar especial? Para comprobar la presencia de un vacío, se necesita un modelo de comportamiento del espacio, el tiempo y la materia en su vecindad. Precisamente un tal modelo fue formulado en 1933 por el canónigo Georges Lemaître; lo redescubrió un año después Richard Tolman y, tras la Segunda Guerra Mundial, lo elaboró Hermann Bondi. El universo que imaginaron tenía ritmos de expansión que dependían no sólo del tiempo, sino también de la distancia a un punto específico, al igual que en la hipótesis que estamos considerando.

Con el modelo Lemaître-Tolman-Bondi se pueden formular predicciones para algunas cantidades observables. Para empezar, acerca de las supernovas que condujeron a inferir la

SEÑALES DE UN VACIO

Aunque un vacío cósmico imitase la energía oscura, la coincidencia no sería exacta. Próximas observaciones buscarán indicadores de las diferencias.

- Observaciones adicionales de supernova precisarán el ritmo de expansión y verificarán si éste varía con la posición, como predice el modelo de un vacío.
- Los cúmulos de galaxias reflejan la luz. Nos permiten así ver nuestro vecindario cósmico como en un espejo. Si vivimos en un vacío, podríamos descubrirlo de ese modo.
- Las galaxias y los cúmulos de galaxias evolucionan a un paso que depende del ritmo de expansión en su ubicación y, por tanto, de la presencia de un vacío.
- Los neutrinos remanentes del universo primitivo podrían revelar un vacío.



2. LA SUPERNOVA 1994D (*flecha*) y explosiones similares se utilizan como marcadores de la expansión cósmica.

NASA/ESA, HUBBLE KEY PROJECT TEAM AND HIGH-Z SUPERNOVA SEARCH TEAM



PLANCK

La última nave espacial para medir la radiación de fondo cósmico de microondas, Planck, de la Agencia Espacial Europea, fue lanzada al espacio el 14 de mayo.

Planck proporcionará un inventario completo de las fluctuaciones de la temperatura del fondo de microondas, completando así un esfuerzo observacional que se inició en la década de los sesenta. Estas fluctuaciones ponen de manifiesto el aspecto del universo a los 400.000 años de la gran explosión y cómo ha crecido desde entonces. Podría decirnos si vivimos en un vacío gigante.

Además, Planck medirá las fluctuaciones de la polarización (o direccionalidad) de la radiación, lo que podría revelar si se propagaron ondas gravitacionales como resultado de procesos de alta energía sucedidos una fracción de segundo después de la gran explosión, o incluso antes.

existencia de la energía oscura. Cuantas más supernovas se observen, con mayor precisión se podrá reconstruir la historia de la expansión del universo. Estrictamente hablando, tales observaciones no pueden nunca descartar el modelo del vacío, porque resulta posible recrear cualquier conjunto de datos de supernovas eligiendo un vacío de forma adecuada. Sin embargo, para que un vacío fuese totalmente indistinguible de la energía oscura, habría de presentar propiedades muy extrañas.

La razón es que la supuesta expansión acelerada se esté produciendo justo ahora. Para que un vacío la imite exactamente, el ritmo de expansión debe disminuir drásticamente al alejarse de nosotros y en cualquier dirección. Por lo tanto, la densidad de materia y energía debe aumentar de forma sustancial al alejarse de nosotros en cualquier dirección. El perfil de densidad tendría que parecerse a un sombrero de bruja invertido; la punta correspondería al lugar donde vivimos. Tal perfil iría en contra de toda nuestra experiencia sobre las estructuras del universo: no las hay puntiagudas. Peor todavía. Ali Vanderveld y Éanna Flanagan mostraron que la punta del sombrero, donde vivimos, tendría que ser una singularidad, igual que la región ultradensa del centro de un agujero negro.

Si el vacío evidencia un perfil de densidad más suave, más realista, aparece una clara señal observable. Los vacíos de forma suave aún predicen observaciones que se confunden con la aceleración, pero al no ser picudos no reproducen exactamente los mismos resultados que la energía oscura. En particular, el aparente ritmo de aceleración varía con el corrimiento hacia el rojo; lo hace de una manera reveladora. Con Kate Land mostramos que varios centenares de nuevas supernovas, además de los centenares que ya tenemos estudiados, deberían bastar para resolver la cuestión. Las misiones encaminadas a la observación de supernovas tienen una muy buena posibilidad de lograr pronto el objetivo.

Los datos de las supernovas no son los únicos con que se puede contar. Jeremy Goodman, de la Universidad de Princeton, sugirió otra posible prueba en 1995: la radiación de fondo de microondas. Por entonces no se habían realizado las observaciones que llevarían a pensar en la existencia de la energía oscura. Goodman no buscaba la explicación de ningún fenómeno inexplicado, sino la prueba del principio copernicano. Su planteamiento consistía en valerse de los cúmulos de galaxias distantes para mirar el universo desde diferentes posiciones, como si fueran espejos de un probador celeste. Los cúmulos de galaxias reflejan una pequeña fracción de la radiación de microondas que les llega. Midiendo cuidadosamente el espectro de esta radiación cabe inferir cómo se vería el universo desde uno de ellos. Si un cambio del punto de observación cambiara el aspecto del universo, nos hallaríamos ante una prueba contundente de la presencia de un vacío o una estructura similar.

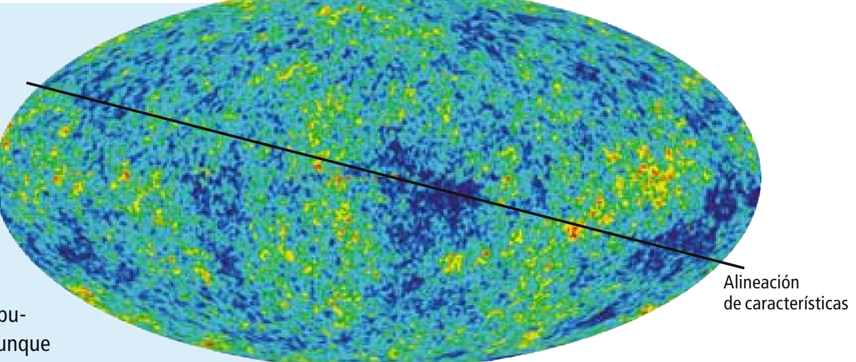
Dos equipos de cosmólogos han sometido a prueba esa idea. Robert Caldwell y Albert Stebbins estudiaron precisas mediciones de distorsiones en el fondo de microondas, y Juan García-Bellido, de la Universidad Autónoma de Madrid, y Troels Haugbølle, de la Universidad de Aarhus en Dinamarca, observaron

Rendirse al vacío

La mayoría de las hipótesis partidarias de que vivimos en un vacío cósmico nos colocan en su centro. Pero, ¿y si viviéramos lejos de su centro? El universo parecería entonces un poco desequilibrado. Håvard Alnes y Morad Amarzguioui, de la Universidad de Oslo, han demostrado que la radiación del fondo cósmico de microondas se vería ligeramente más caliente en una dirección que en otra. Esa asimetría dipolar ha sido observada en el fondo de microondas. Por lo general, se atribuye al movimiento de nuestro sistema solar a través del espacio, aunque pudiera constituir también un signo de un universo granular.

Asimismo, las pequeñas fluctuaciones en el fondo de microondas parecen alinearse en una dirección determinada, apodada "el eje del mal" por João Magueijo y Kate Land [*véase* "Disonancia cósmica", por Glenn D. Starkman y Dominik J. Schwarz; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2005]. Esta alineación indica una dirección preferida en el cielo que, aunque difícil de imaginar en un universo copernicano, podría explicarse como una consecuencia de nuestro desplazamiento respecto al centro de un vacío. Una dirección preferente tendría, además, otros efectos; por ejemplo, movimientos coherentes a gran escala de galaxias y de cúmulos de galaxias. Varios investigadores han afirmado haber detectado una tal "corriente oscura", pero siguen siendo aseveraciones controvertidas.

Por tentador que parezca atribuir tales anomalías a un gran vacío, tal explicación no se sostiene. Para empezar, cada uno de estos efectos apunta en distintas direcciones. Además, la intensidad del dipolo cósmico daría a entender que estamos sólo a unos 50 millones de años luz del centro, una fracción muy pequeña del tamaño total del supuesto vacío.



3. EL "EJE DEL MAL", una alineación de características de la radiación de fondo cósmico de microondas, podría ser una señal de que vivimos en un universo inhomogéneo.

ESA/AOES MEDIALAB (*arriba*); NASA/WMAP SCIENCE TEAM (*abajo*)

directamente cúmulos individuales. Ninguno de los grupos detectó un vacío; lo más que pudieron hacer fue condicionar las propiedades que habría de tener. El satélite Planck, que se lanzó en mayo, debería poner límites más estrechos a las propiedades del vacío o, quizá, descartarlo incluso.

Un tercer enfoque, preconizado por Bruce Bassett, Chris Clarkson y Teresa Lu, consiste en acometer mediciones independientes del ritmo de expansión en diferentes lugares. Los ritmos de expansión suelen determinarse a partir del desplazamiento hacia el rojo, que es el efecto acumulativo de la expansión de todas las regiones del espacio entre un cuerpo celeste y nosotros. Al aglomerar todas esas regiones, el desplazamiento hacia el rojo no puede distinguir entre una variación del ritmo de expansión en el espacio y una variación en el tiempo. Sería mejor medir el ritmo de expansión en determinadas ubicaciones espaciales, y separar los efectos de la expansión en otros lugares. Se trata de una propuesta difícil, cierto; no se ha realizado todavía.

Una posibilidad es observar cómo las estructuras se forman en distintos lugares. La formación y evolución de las galaxias y los cúmulos de galaxias depende, en buena medida, del ritmo de expansión local. Mediante el estudio de estos objetos en diferentes lugares, y teniendo en cuenta otros efectos que intervienen en su evolución, podrían identificarse sutiles diferencias en el ritmo de expansión.

Un lugar no tan especial

La posibilidad de que vivamos en medio de un gran vacío cósmico supone rechazar de plano el principio cosmológico. Caben, no obstante, opciones menos radicales. El universo podría obedecer al principio cosmológico a gran escala, pero los huecos y filamentos más pequeños que las observaciones de galaxias han puesto de manifiesto podrían, en su conjunto, imitar los efectos de la energía oscura.

Tirthabir Biswas y Alessio Notari, ambos de la Universidad McGill, así como Valerio Marra y sus colaboradores, han estudiado esa idea. En sus modelos el universo recuerda la imagen de un queso suizo: uniforme en su conjunto y lleno de agujeros. En consecuencia, el ritmo de expansión varía ligeramente de un lugar a otro. Los rayos de luz emitidos por las supernovas distantes viajan a través de una multitud de estos pequeños vacíos antes de llegar a nosotros; las variaciones en el ritmo de expansión modifican su brillo y su corrimiento hacia el rojo. Hasta ahora, sin embargo, la idea no parece muy prometedora.

Uno de nosotros (Clifton) ha demostrado, con Joseph Zuntz, de Oxford, que la reproducción de los efectos de la energía oscura necesitaría un montón de vacíos de muy baja densidad distribuidos de una manera especial.

Otra posibilidad es que la energía oscura sea un artefacto de las aproximaciones matemáticas que los cosmólogos acostumbran utilizar. Para calcular el ritmo de expansión cósmico, contamos la cantidad de materia que contiene una región del espacio, la dividimos por el volumen de la región y llegamos a una densidad de energía media. A continuación, insertamos esta densidad media en las ecuaciones de Einstein de la gravedad y determinamos el ritmo de expansión promedio del universo. Aunque la densidad varía de un lugar a otro, tratamos la dispersión de marras como pequeñas fluctuaciones en torno a la media global.

Ahora bien, resolver las ecuaciones de Einstein para una distribución de materia promedio no es lo mismo que resolverlas para la distribución de materia real y a continuación promediar la geometría resultante. En otras palabras, promediamos y después resolvemos, cuando en realidad deberíamos resolver y, a continuación, promediar.

Resolver todo el conjunto de ecuaciones para cualquier cosa que, siquiera vagamente, se aproxime al universo real reviste una dificultad endemoniada. Se opta por recurrir a la vía más sencilla. Thomas Buchert, de la Universidad de Lyon, ha emprendido la tarea de determinar hasta qué punto se trata de una buena aproximación. Ha introducido un conjunto de términos extra en las ecuaciones cosmológicas para tener en cuenta el error introducido al promediar antes de resolver. Si estos términos resultan ser pequeños, entonces la aproximación será buena; si son grandes, no. Los resultados hasta la fecha no se muestran concluyentes. Algunos han sugerido que los términos adicionales bastarían para explicar toda la energía oscura, mientras que otros subrayan su insignificancia.

Las pruebas observacionales para distinguir entre la energía oscura y los modelos de vacío deberán llevarse a cabo en un futuro muy próximo. La búsqueda de supernovas dirigida por Pierre Astier y la Misión Conjunta de la Energía Oscura, actualmente en desarrollo, ayudarán a precisar la historia de la expansión del universo. El satélite Planck y un conjunto de instrumentos terrestres y en globos cartografiarán el fondo de microondas con un detalle cada vez mayor. La Batería del Kilómetro Cuadrado (Square Kilometer Array), un radiotelescopio gigante, previsto para 2020, nos dará un censo de todas las galaxias dentro de nuestro horizonte observable. Esta revolución en la cosmología, iniciada hace diez años, se encuentra lejos de haber terminado.

Los autores

Timothy Clifton y **Pedro G. Ferreira** son cosmólogos de la Universidad de Oxford. Ambos estudian la física del universo primitivo y posibles modificaciones de la teoría general de la relatividad de Einstein.

Bibliografía complementaria

GEOCENTRISM REEXAMINED. Jeremy Goodman en *Physical Review D*, vol. 52, n.º 4, págs. 1821-1827; 15 de marzo, 1995 (http://es.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/9506/9506068v1.pdf).

THE STATE OF THE UNIVERSE: A PRIMER IN MODERN COSMOLOGY. Pedro G. Ferreira. Phoenix, 2007.

COSMOLOGY: PATCHY SOLUTIONS. G. F. R. Ellis en *Nature*, vol. 452, págs. 158-161; 12 de marzo, 2008.

LIVING IN A VOID: TESTING THE COPERNICAN PRINCIPLE WITH DISTANT SUPERNOVAE. Timothy Clifton, Pedro G. Ferreira y Kate Land en *Physical Review Letters*, vol. 101, n.º 131.302; 26 de septiembre, 2008 (http://es.arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0807/0807.1443v2.pdf)

Salvar
la abeja melífera

El misterioso síndrome de despoblamiento de las colmenas ha eliminado poblaciones enteras de abejas polinizadoras. Las causas son complejas, pero ya hay soluciones a la vista

Diana Cox-Foster y Dennis vanEngelsdorp



Dave Hackenberg se gana la vida transportando abejas. Recorriendo de arriba abajo la costa este norteamericana y, a veces, yendo de costa a costa, Hackenberg transporta en camión de un campo a otro sus colmenas para polinizar cultivos: melones en Florida, manzanas en Pennsylvania, arándanos en Maine y almendras en California.

Tal como venía haciendo desde hacía 42 años, en otoño de 2006 Hackenberg emigró con su familia y sus abejas desde su casa veraniega del centro de Pennsylvania hasta sus cuarteles de invierno en el centro de Florida. Los insectos acababan de terminar su tarea de polinización en los florecientes campos de calabazas de Pennsylvania y se disponían a captar el último flujo de néctar del amor seco (*Bidens pilosa*) de Florida. Cuando Hackenberg pasó revista a sus polinizadores, las colonias "bullían" de abejas, por decirlo con sus palabras. Pero al volver, un mes después, quedó horrorizado: muchas de las colonias restantes habían perdido gran número de obreras; sólo quedaban y parecían sanas las obreras jóvenes y la reina. Más de la mitad de las 3000 colmenas aparecieron vacías, ni siquiera había abejas muertas. "Era como un pueblo fantasma", dijo Hackenberg cuando nos llamó en busca de una explicación para esa misteriosa desaparición.

Junto con otros investigadores, constituimos un equipo de trabajo interdisciplinario. En diciembre de 2006, ya habíamos descrito el fenómeno: se denominaría síndrome de despoblamiento de las colmenas (SDC). Las colonias de Hackenberg dejaron de morir a la primavera siguiente; mas, para entonces, habían sobrevivido sólo 800 de las 3000 originales. Cuando Hackenberg se puso en contacto con colegas de todo el país, descubrió que no era el único. Un seguimiento que nuestro equipo realizó en la primavera de 2007 reveló que la cuarta parte de los apicultores estadounidenses habían padecido pérdidas similares y que habían muerto más del 30 por ciento de las colonias.

El invierno siguiente, la mortandad se repitió y se extendió; afectó al 36 por ciento de los apicultores estadounidenses. Se registraron grandes pérdidas también en Australia, Brasil, Canadá, China, Europa y otras regiones. Todavía no disponemos de datos más recientes, pero algunos apicultores nos informan de que sus colonias han padecido asimismo despoblamiento el último invierno.

La pérdida de abejas ha disparado las alarmas. No es para menos: un tercio de la producción agrícola mundial depende de la abeja melífera europea (*Apis mellifera*), la especie que han adoptado de forma universal los apicultores de los países occidentales. Los grandes monocultivos agrícolas requieren, durante cortos períodos anuales, una actividad polinizadora intensa, una tarea que otros polinizadores (abejas silvestres y murciélagos) no pueden realizar. Sólo *A. mellifera* despliega ejércitos de polinizadores en casi cualquier momento del

CONCEPTOS BASICOS

- Millones de colmenas del mundo entero han quedado vacías al desaparecer misteriosamente las abejas melíferas, con el consiguiente riesgo de un centenar de cultivos que requieren polinización.
- La investigación revela que se trata de una enfermedad compleja: una combinación de factores, entre ellos las prácticas agrícolas, aumentan la vulnerabilidad de las abejas a los virus.
- Ser cuidadosos con la higiene de la colmena favorece la prevención. El desarrollo de productos antivíricos puede conducir a soluciones farmacológicas.

CHARLES KREBS





1. DAVE HACKENBERG fue el primer apicultor que alertó a los entomólogos estadounidenses, en otoño de 2006, acerca de la inexplicable desaparición de abejas obreras, una señal de lo que se conoce hoy como síndrome de despoblamiento de las colmenas. Para finales de invierno de ese año, más del 60 por ciento de sus 3000 colonias habían muerto; en todos los EE.UU., la pérdida fue del 30 por ciento.

año, dondequiera que el tiempo sea bonancible y haya flores que visitar.

Nuestra investigación ha descartado un gran número de causas potenciales para el SDC y ha encontrado varios factores que quizá contribuyan. Pero no se ha identificado un culpable claro. Las abejas que padecen SDC tienden a resultar infestadas por múltiples patógenos, entre ellos un virus descubierto en fecha reciente, si bien estas infecciones parecen secundarias y oportunistas (como la pulmonía que mata a un paciente de sida). El SDC correspondería a una enfermedad compleja multicausal. Tal vez no exista un remedio sencillo. Es posible que debamos ser más cuidadosos con el ambiente y realizar cambios a largo plazo en nuestras prácticas apícolas y agrícolas.

Antes del despoblamiento de las colmenas, las abejas melíferas habían padecido enfermedades que menguaron sus poblaciones. El número de colonias de abejas melíferas gestionadas en los EE.UU. era en 2006 de unos 2,4 millones, menos de la mitad de las que había en 1949. Pero los apicultores no recuerdan pérdidas invernales tan espectaculares como las ocurridas en 2007 y 2008. Aunque probablemente el SDC no provocará la extinción de las abejas melíferas, puede dejar sin trabajo a muchos apicultores. Si, como resultado, el oficio de apicultor se convirtiera en una rareza, aunque terminara por superarse el SDC, alrededor de un centenar de las plantas cultivadas se quedarían sin polinizadores y la producción a gran escala de ciertos cultivos sería imposible. Nos quedarían el maíz, el trigo, la patata y el arroz. Pero muchas frutas y verduras de consumo habitual (manzanas, arándanos, brécol y almendras, entre otros) se convertirían en manjar de reyes.

Florecimiento silencioso

Cuando Hackenberg nos informó sobre la desaparición de sus abejas, pensamos en la varroosis, una enfermedad causada por ácaros *Varroa*. Estos parásitos agresivos fueron en gran parte responsables de la reducción en un 45 por ciento del número de colmenas gestionadas en todo el mundo entre 1987 (cuando se introdujeron en los EE.UU.) y 2006. Las hembras adultas de los ácaros se alimentan de hemolinfa, la sangre de las abejas. Los ácaros transportan, asimismo, virus e inhiben la respuesta inmunitaria del huésped. Hackenberg, que como la mayoría de los apicultores expertos contaba ya con una larga experiencia de lucha contra los ácaros, insistía en que esta vez los síntomas eran otros.

Uno de nosotros (vanEngelsdorp) realizó autopsias de los insectos que todavía le quedaban a Hackenberg. Halló síntomas novedosos; entre otros, tejido cicatricial en los órganos internos. Las pruebas iniciales detectaron algunos de los agentes que suelen causar enfermedades apiares. En el contenido intestinal encontramos esporas de *Nosema*, parásitos fúngicos unicelulares que causan disentería apiar. Sin embargo, los recuentos de esporas en esa muestra y otras posteriores no ofrecían cifras que permitieran explicar la despoblación.

El análisis molecular de las abejas de Hackenberg, que realizó el otro autor (Cox-Foster), reveló asimismo niveles sorprendentes de infecciones víricas de varios tipos. Pero ninguno de los patógenos hallados en los insectos explicaba, por sí mismo, la escala de la desaparición.

Todas las abejas estaban enfermas, pero cada colonia parecía sufrir una combinación distinta de patologías. Planteamos la hipótesis de que algo había comprometido el sistema inmunitario de las abejas, exponiéndolas a varias infecciones que, en condiciones normales, las colonias sanas habrían mantenido a raya. Hackenberg tenía razón: los sospechosos principales, los ácaros *Varroa*, no se hallaban presentes en número suficiente para explicar la súbita mortandad.

En la primavera de 2007, mediante entrevistas a apicultores, acometimos el seguimiento de la gestión de las colmenas en todas sus fases. Esta y otras investigaciones posteriores sirvieron para descartar varias causas potenciales. No podía echarse la culpa a un método concreto de gestión apícola. Los grandes apicultores comerciales tenían tantas probabilidades de sufrir el SDC como los apicultores pequeños



o los aficionados. Los síntomas afectaban a los apicultores estables y a los trashumantes. Se vieron afectados incluso algunos apicultores ecológicos.

Con la publicación sucesiva de informes sobre mortandad, las personas concernidas empezaron a preocuparse y aportaron sus ideas sobre la causa subyacente. Algunas hipótesis surgieron de estudios mal diseñados (como las que culpaban a la radiación procedente de los teléfonos móviles); otras eran, en el mejor de los casos, indemostrables (llegó a proponerse la abducción alienígena de las abejas).

A tenor de una teoría que tuvo una buena acogida, las abejas podían haber sido envenenadas por polen procedente de cultivos transgénicos, en concreto las plantas Bt. Las plantas Bt contienen un gen para una toxina insecticida que produce la bacteria *Bacillus thuringiensis*. Cuando las orugas de la plaga de insectos comen plantas que producen esas toxinas, mueren. Pero ya antes del inicio del SDC, se había demostrado que la toxina Bt se activaba sólo en el estómago de orugas, mosquitos y ciertos escarabajos. El tubo digestivo de las abejas melíferas y de otros muchos insectos no permite que la Bt actúe.

Otra teoría popular —más creíble— acusaba a los venenos sintéticos. Los dos sospechosos principales eran los acaricidas y los plaguicidas, ya fuera en el ambiente o en los campos de cultivo que las abejas polinizaban. En 2006, nuevos plaguicidas habían sustituido a las variedades más antiguas. En particular, los apicultores franceses y de otros países atribuían a los neonicotinoides el daño contra los insectos polinizadores. Se trata de insecticidas que remedan los efectos de la nicotina (defensa natural que las plantas del tabaco despliegan contra las plagas de defoliadores); resulta más tóxica para los insectos que para los vertebrados. Ahora bien, los neonicotinoides penetran en el polen y el néctar de la planta, no sólo en las hojas, con lo que afectan potencialmente a los polinizadores. Con anterioridad, se había demostrado que los neonicotinoides reducían la capacidad de las abejas de recordar el camino a su colmena, señal de que éstos podían contribuir al SDC.

Con nosotros, otros expertos sospechaban que las abejas podían hallarse debilitadas por desnutrición. Lo mismo que los polinizadores silvestres, las abejas melíferas ya no disponen de la misma cantidad ni variedad de flores, porque los humanos hemos intentado "asear" nuestro entorno. Hemos plantado superficies enormes de cultivos, sin delimitarlos con setos vivos, que aportan hierbajos y flores; mantenemos grandes extensiones de céspedes libres de "malas hierbas" (tréboles, dientes de león); incluso los bordes de caminos y parques reflejan nuestro deseo de mantener el entorno limpio.

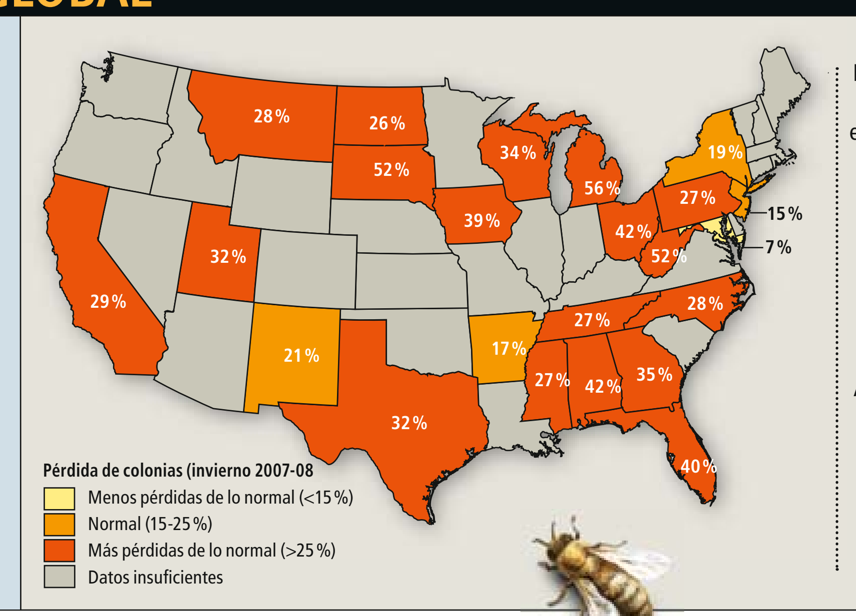
Mas, para las abejas y otros polinizadores, el césped es un desierto. La dieta de las abejas melíferas que polinizan grandes extensiones de un monocultivo puede carecer de nutrientes importantes, en comparación con la de los polinizadores que comen de fuentes variadas, como sería típico del ambiente natural. Los apicultores han intentado compensarlo mediante el suministro a las colonias de suplementos proteínicos, pero éstos no han logrado prevenir el SDC.

Los autores

Diana Cox-Foster enseña entomología en la Universidad estatal de Pennsylvania. Codirige el equipo de trabajo sobre el síndrome de despoblamiento de las colmenas, constituido por expertos del gobierno y la academia. Centra su investigación en las interacciones entre huésped y patógeno. **Dennis vanEngelsdorp** participa en varios proyectos apícolas en las Antillas. Es apicultor funcionario de la mancomunidad de Pennsylvania y miembro asociado del departamento de entomología de la Universidad estatal de Pennsylvania.

UN AZOTE GLOBAL

El síndrome de despoblamiento de las colmenas (SDC) volvió por segunda vez en invierno de 2007. Una encuesta a los apicultores preguntaba en la primavera de 2008 cuántas colonias habían sucumbido aquel invierno. En todos los EE.UU., se perdió el 36 por ciento de las colonias (la reducción invernal típica se sitúa entre el 15 y el 25 por ciento); el 60 por ciento de dichas pérdidas se atribuyeron al SDC. La mayoría de los estados para los que se dispuso de datos resultaron gravemente afectados. También se informó de grandes pérdidas en Australia, Brasil, Canadá, China y Europa.



Número de colonias de abejas que se estima que murieron en los EE.UU. a lo largo del invierno de 2007:

Entre 750.000 y 1 millón

Algunos apicultores informaron haber perdido hasta el

90 %

de sus colmenas

JEN CHRISTIANSEN, FUENTE: "A SURVEY OF HONEY BEE COLONY LOSSES IN THE U.S., FALL 2007 TO SPRING 2008", POR D. VANENGELSDORP ET AL. EN *PLOS ONE*, VOL. 3, N.º 12, ARTICULO E4071; DICIEMBRE DE 2008 (*mapa*)





2. SIN ABEJAS, muchos de los alimentos que incluimos en nuestro desayuno (*izquierda*) serían demasiado escasos para que la mayoría de la gente se pudiera permitir adquirirlos (*derecha*). La escasez afectaría a varios frutos, así como a jaleas y mermeladas, almendras e incluso a la leche, ya que las granjas lecheras utilizan alfalfa (que necesita polinizadores) como pienso rico en proteínas para las vacas.

EN CIFRAS

- Se estima que hay en los EE.UU. entre 900 y 1000 apicultores comerciales, que gestionan 2,4 millones de colonias.
- Hay cerca de 100 tipos de cultivos que necesitan ser polinizados por abejas melíferas. El valor anual del trabajo de las abejas es de 14.000 millones de dólares en los EE.UU. y de 215.000 millones en todo el mundo.
- Al llegar febrero, las colmenas móviles de los EE.UU. se llevan a California para que polinicen los almendros.
- Incluso antes del SDC, en algunas regiones de China, las abejas habían desaparecido por completo, posiblemente debido al uso de plaguicidas; ello obligó a los agricultores a polinizar manualmente los perales.

Esfuerzo generalizado

Centramos nuestras investigaciones en esos dos sospechosos (plaguicidas y desnutrición) y en una tercera causa posible del SDC: un patógeno nuevo o con una mutación reciente. La comprobación de nuestras tres hipótesis requería tomar cientos de muestras. Establecimos un plan de trabajo conjunto con Jeff Pettis, del laboratorio del Departamento de Agricultura de los EE.UU. (USDA) en Beltsville, Maryland, para llevar a cabo un empeño que habría de requerir largas jornadas, muchísimos kilómetros en la carretera y el reto de reunir material suficiente para compartir con todo el equipo. Al no disponer de abejas muertas para el estudio, decidimos recolectar abejas vivas de apiarios en pleno desplome; suponíamos que las supervivientes albergarían la enfermedad en su estadio inicial. Se recolectaron abejas y se conservaron en alcohol para realizar los recuentos de *Varroa* y *Nosema*. Se congelaron abejas, polen y cera de panales en hielo seco; acto seguido, se enviaron a laboratorios de Pennsylvania o Maryland, donde se almacenaron en congeladores ultrafríos y se conservaron para análisis moleculares y químicos.

Enviamos algunas muestras a nuestro colaborador David Tarpy, de la Universidad estatal de Carolina del Norte, que midió el contenido en proteínas. Tarpy no halló diferencias notables entre los apiarios que presentaban SDC y otros que, en apariencia, estaban sanos. El estado nutricional no explicaba el SDC.

La sorpresa fue mayor en lo que atañe a la búsqueda de plaguicidas. Contamos con la ayuda de Maryann Frazier, Jim Frazier y Chris Mullin, de la Universidad estatal de Pennsylvania, y Roger Simonds, del laboratorio del Departamento de Agricultura en Gastonia, Carolina del Norte (casualmente, el propio Simonds es apicultor). Su análisis de amplio espectro, sensible a insecticidas, herbicidas y fungicidas, encontró más de 170 sustancias. La mayoría de las muestras de polen almacenadas contenían cinco compuestos o más; algunas hasta 35. Pero aunque los niveles y la diversidad de sustancias eran preocupantes, ninguna de ellas parecía responsable exclusivo del SDC.

En las muestras originales no se encontraron neonicotinoides. Pero esos, u otros, plaguicidas no pueden exonerarse todavía. Las colonias de abejas son dinámicas. Nuestro muestreo inicial, no: tomamos muestras una sola vez. Sigue siendo posible —aunque poco probable— que las abejas afligidas por el SDC fueran dañadas por una sustancia, o una mezcla de sustancias, que no supimos descubrir cuando recolectamos las muestras.

Parecía que nuestro empeño en identificar una nueva enfermedad infecciosa (o una nueva cepa de una enfermedad antigua) que pudiera hallarse en la raíz del SDC no nos llevaba a ninguna parte. Ninguna de las enfermedades apiares bacterianas, fúngicas o víricas conocidas explicaba las pérdidas debidas al SDC. Ninguna pista guiaba nuestra búsqueda.

Entonces, Cox-Foster, el grupo de Ian Lipkin, de la Universidad de Columbia, y la compañía biotecnológica 454 Life Sciences, de Branford (Connecticutt), recurrieron a la metagenómica, un complejo método de caza de microorganismos. En esta técnica, se recogen ácidos nucleicos (ADN y ARN) de un ambiente que contiene múltiples organismos. El material genético se mezcla y se desmenuza en fragmentos lo bastante cortos para que sus secuencias puedan descifrarse.

En la secuenciación génica ordinaria, el siguiente paso sería volver a ensamblar los fragmentos y reconstruir, mediante programas informáticos, el genoma del organismo original. En la metagenómica, en cambio, al pertenecer los genes a organismos diferentes, la secuenciación produce una instantánea de las secuencias de una colección de organismos de un ecosistema, incluidos los microscópicos.

Se ha utilizado la metagenómica para estudiar ambientes como el agua de mar y el suelo. Y nos ha revelado una microbiodiversidad sorprendente. Podemos aplicar también la metagenómica a la detección de microorganismos que medran en el seno de un organismo



mayor, ya sea como colaboradores (simbiontes) o como agentes infecciosos.

Como es natural, la mayoría de las secuencias génicas en nuestras muestras procedían de las abejas. Pero éstas eran fáciles de filtrar, ya que, para nuestra fortuna, acababa de secuenciarse el genoma de la abeja melífera. A continuación, se compararon las secuencias no apiares con secuencias genéticas de organismos conocidos. A nuestro equipo se agregaron expertos en análisis molecular de organismos (bacterias, hongos, parásitos y virus) para identificar potenciales culpables.

Ese estudio nos permitió ahondar en la biología de las abejas. Demostró que todas las muestras (las enfermas y las sanas) contenían ocho bacterias que se habían descrito en dos trabajos precedentes de otras partes del mundo. Quizá se trate, pues, de bacterias simbiontes, que desarrollan una función esencial en la biología de las abejas, como coadyuvar a la digestión. Hallamos también dos especies de *Nosema*, otros dos hongos y varios virus de abejas.

Destacaba uno de los virus apiares, que hasta entonces no se había identificado en los EE.UU.: el virus de la parálisis aguda de Israel (IAPV, por sus siglas en inglés). Este patógeno lo describió en 2004 Ilan Sela, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, en el curso de una investigación sobre la muerte con ataques de parálisis que sufrían las abejas. En nuestro análisis inicial, el IAPV se halló en la mayoría de las colonias con síntomas de SDC (aunque no en todas) y en una que no lo padecía. Tan alta correlación, sin embargo, no demostraba que el IAPV fuera la causa de la enfermedad. El SDC podría haber hecho simplemente que las abejas se manifestaran vulnerables en extremo a la infección por IAPV.

¿Caso cerrado?

El trabajo posterior sobre el virus de la parálisis aguda de Israel nos ha conducido al descubrimiento de la existencia de tres cepas del virus, al menos; conocemos, además, que dos de ellas infectan abejas en los Estados Unidos. Es muy probable que una de las cepas acompañara las colonias que llegaron por vía aérea desde Australia en 2005, después de que el gobierno estadounidense levantara el embargo de abejas melíferas decretado en 1922. (La industria almendrera cabildeó para levantar la prohibición, con el propósito de evitar una carencia crítica de polinizadores en el momento de la floración.)

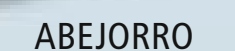
La otra cepa, muy distinta, apareció probablemente antes. Se desconoce su procedencia. Pudo haber sido introducida con la importación de jalea real (un nutriente que las abejas secretan para alimentar a sus larvas) o de un suplemento polínico; pudo haber también llegado a los EE.UU. en plagas de abejas recién introducidas. Los datos sugieren que el IAPV existe desde hace cierto tiempo en las abejas de otras partes del mundo, donde se habría desarrollado en numerosas cepas y transformado rápidamente.

En un esfuerzo para zanjar la cuestión del IAPV, Cox-Foster experimentó sobre abejas sanas que hasta entonces no habían estado expuestas al virus. Su equipo colocó colmenas llenas de abejas en invernaderos y les dio de comer agua azucarada cargada de IAPV. Como cabía esperar, la infección provocó algunos de los mismos síntomas que el SDC. Al cabo de una o dos semanas de exposición, las abejas empezaron a morir, contorsionándose sobre el suelo con ataques de parálisis. Igual que en el SDC, las abejas no morían cerca de las colmenas. Dichos hallazgos apoyaban, pues, la hipótesis de que el IAPV causaba el SDC o, por lo menos, contribuía al problema.

Sin embargo, muestreos adicionales realizados por varios grupos demostraron que el



También los polinizadores salvajes enferman



ABEJORRO

Las abejas melíferas no son los únicos polinizadores que han sufrido bajas en su población a lo largo de los últimos años. Un informe del Consejo Nacional de Investigación (NRC) de 2006 señalaba tendencias a la reducción en las poblaciones de determinadas especies de polinizadores silvestres de Norteamérica: insectos, murciélagos y colibríes. Según la autora principal del estudio, la entomóloga May Berenbaum, de la Universidad de Illinois, esas especies pueden estar padeciendo algunas alteraciones originadas por el hombre (introducción de enfermedades, envenenamiento por plaguicidas y empobrecimiento de hábitats) que hacen que las abejas sean vulnerables al SDC.

El abejorro occidental ha desaparecido de una región que se extiende desde el centro de California hasta la Columbia Británica; según Robbin Thorp, de la Universidad de California en Davis, el culpable sería *Nosema bombi*, un microorganismo fúngico unicelular. El hongo pudo haber pasado a los abejorros occidentales desde abejorros europeos que agricultores estadounidenses importaron para que colaboraran en la polinización de tomates y otras plantas de invernadero.

Una investigación publicada en el número de enero de *Biological Conservation* tenía en cuenta datos históricos de Illinois. Según el estudio, cuatro especies de abejorros desaparecieron allí entre 1940 y 1960, período que coincidió con una intensificación agrícola a gran escala en el estado y con la consiguiente pérdida de hábitats de pradera, bosque y humedales.

La reducción en las poblaciones de unas pocas especies de murciélagos polinizadores y de colibríes (hasta el punto que algunos murciélagos se encuentran en peligro de extinción) podría guardar relación con alteraciones del hábitat. Muchos de estos animales pasan el invierno en México; los biólogos insisten en la conservación de "corredores de néctar", donde los animales puedan encontrar flores a lo largo de sus rutas de migración.

Pero el informe de la NRC advertía que los biólogos hacen el seguimiento de sólo unas cuantas especies de polinizadores (se estima que existen unas 200.000) en todo el mundo; no se sabe mucho acerca del estado de salud de la mayoría de ellas. Varias colaboraciones basadas en la Red piden la ayuda de ciudadanos y científicos. Los voluntarios toman fotografías de los polinizadores y las exponen en páginas web, en donde los investigadores identifican las especies y toman nota de dónde fueron vistas.

En 2008, el Congreso estadounidense introdujo, en su legislación agraria, medidas de protección para los polinizadores: entre otras, estableció reservar tierras de conservación donde crecieran flores silvestres y proporcionaran néctar. Un hito importante, en la opinión de Berenbaum.

—***Davide Castelvecchi***

DERRICK DITCHBURN *www.dereilanatureinn.ca*

Muchos sospechosos, pero todavía ningún culpable

Los investigadores han rastreado todos los aspectos de la vida de las abejas en busca del culpable del despoblamiento de las colmenas. Su trabajo ha exonerado a algunos sospechosos y ha señalado posibles combinaciones de factores que causan el SDC o contribuyen a su manifestación.



SOSPECHOSO: PLAGUICIDAS

Se han encontrado hasta 170 compuestos sintéticos en las colmenas, tanto en colonias enfermas como sanas. Algunas muestras de polen almacenadas en las celdillas contenían hasta 35 sustancias. Aunque ninguno de esos compuestos parece ser la causa del SDC, los plaguicidas pueden debilitar la salud de las abejas.

SOSPECHOSO: ACAROS *VARROA*

Este ácaro, que se ve abajo chupando sangre de una pupa (estado intermedio entre larva y adulto), constituye la plaga más común y destructora de las abejas melíferas. Pero las colonias afectadas por el SDC no presentan infestaciones significativas de ácaros.



SOSPECHOSO: PARASITOS

Algunas de las abejas en las colonias enfermas estaban infectadas por hongos unicelulares, como *Nosema apis* (*abajo*), que invade el tracto intestinal y causa disentería. Pero los niveles de infección eran demasiado bajos para resultar letales.



SOSPECHOSO: VIRUS PARALIZANTE

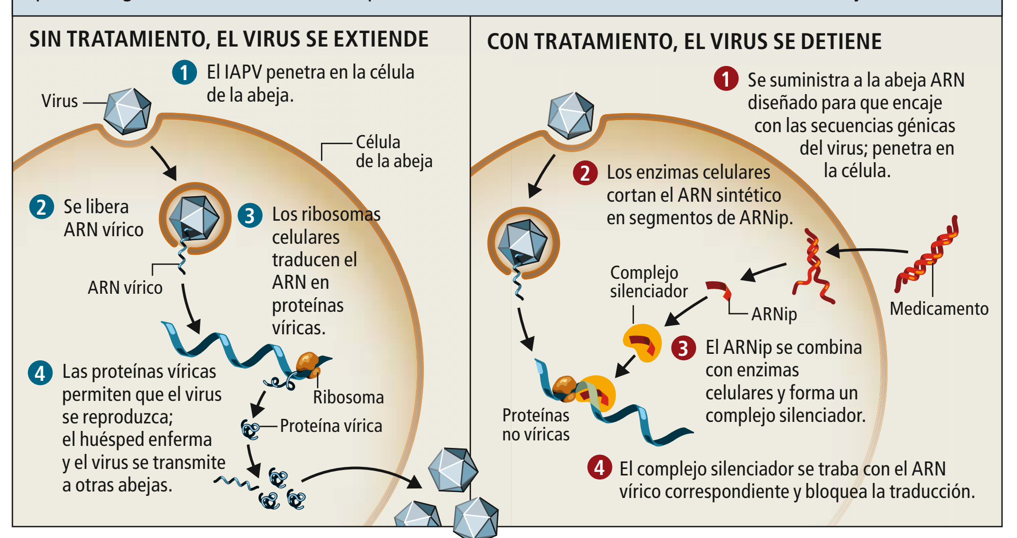
Se ha demostrado que el virus de la parálisis aguda de Israel produce síntomas similares a los del SDC y estaba presente en la mayoría de las colonias afectadas que se han examinado. Podría ser la causa del trastorno o una complicación que fuera el desencadenante último de la muerte.






¿MEDICINA PARA LAS ABEJAS?

Beelogics, una nueva compañía de biotecnología radicada en Miami, está desarrollando un medicamento antivírico que explota un antiguo mecanismo inmunitario: la interferencia de ARN. Las células de la mayoría de los animales y plantas utilizan segmentos de ARN de interferencia pequeño (ARNip) para inhibir la formación de proteínas víricas. En este caso se proporcionaría a colonias de abejas ARNip destinado al virus de la parálisis aguda de Israel (IAPV), como parte de una doble hebra de ARN mezclada en forma de jarabe.



IAPV se hallaba muy extendido en los Estados Unidos; además, no todas las colonias infectadas manifestaban síntomas de SDC, lo que implicaba o bien que el IAPV por sí solo no causaba la enfermedad, o bien que algunas abejas eran resistentes al IAPV. Un estudio conjunto que los dos autores iniciamos en 2007 con el USDA ha seguido la pista de colonias propiedad de tres apicultores trashumantes. Hemos observado colonias infectadas con el IAPV que no se desmoronaban; algunas de ellas incluso han logrado librarse del virus.

La conclusión a la que están llegando los expertos apunta a la concurrencia de múltiples factores (desnutrición y exposición a plaguicidas, entre otros) que interactuarían para debilitar a las colonias y hacerlas susceptibles a un colapso mediado por el virus. En el caso de nuestros experimentos en invernaderos, el estrés de verse confinadas en un espacio limitado pudo haber bastado para hacer que las colonias sucumbieran al IAPV y murieran con síntomas semejantes a los del SDC. Otros resultados, más recientes, de seguimientos a largo plazo han identificado nuevos factores para el aumento de las pérdidas de colonias, entre ellos el fungicida clorotalonil. La investigación se centra ahora en desentrañar la relación entre esos factores y la despoblación de las colonias.

Sería deseable una cura o una vacuna contra los virus apiares, sobre todo el IAPV. Lamentablemente, las vacunas no funcionan en las abejas, porque el sistema inmunitario de los invertebrados no genera el tipo de protección específica que las vacunas inducen en humanos y en otros mamíferos. Los expertos están empezando a adoptar otros enfoques, como el basado en la nueva técnica de interferencia de ARN, que bloquea la reproducción de un virus en el interior de las células apiares. Una solución a más largo plazo consistirá en identificar y reproducir abejas melíferas resistentes a los virus. Pero una tarea de ese tipo puede requerir años, demasiados quizá, para evitar que un gran número de apicultores se vean obligados a cerrar el negocio.

Mientras tanto, muchos apicultores han logrado evitar el despoblamiento de sus colmenas al redoblar los esfuerzos para mejorar la dieta de las colonias, mantener a raya infecciones y parásitos (*Varroa* y *Nosema*) y practicar una higiene adecuada. Se ha demostrado que la esterilización de los viejos marcos de las colmenas con rayos gamma, antes de su reutilización, reduce el riesgo de colapso. Y cambios sencillos en las prácticas agrícolas, como la separación de monocultivos mediante setos vivos, ayudarían a restablecer el equilibrio en la dieta de las abejas, al tiempo que proporcionarían alimento a los polinizadores silvestres.

Necesitamos actuar con prontitud para asegurar que el antiguo pacto entre flores y polinizadores permanezca intacto, con el propósito de salvaguardar nuestro suministro de alimentos y proteger el ambiente durante generaciones. Lograremos así que las abejas sigan proporcionando polinización y que en nuestra dieta no falten frutos y verduras a cuya abundancia estamos acostumbrados.

OTRAS MEDIDAS ESTRATEGICAS

Restablecer el equilibrio en el hábitat de los polinizadores podría mejorar el bienestar general y ayudar a evitar el despoblamiento de las colmenas. Las grandes extensiones de monocultivos o céspedes de áreas residenciales podrían delimitarse con hierbajos y setos vivos. Así, las plantas que florecen en momentos distintos del año proporcionarían mayor variedad en la dieta de los polinizadores y los mantendrían durante todo el año.

Esterilizar con rayos gamma (destruyen el ADN) las colmenas usadas antes de volverlas a utilizar para una nueva colonia reduce el riesgo de recurrencia del SDC, posiblemente porque mata microorganismos que contribuyen a la enfermedad.

El estudio del efecto de los plaguicidas sobre los polinizadores suele centrarse en los efectos letales. Se necesita más investigación sobre si determinados plaguicidas provocan en los insectos estrés, aunque no los maten.



Bibliografía complementaria

INTERFERENCIA DE ADN. Nelson C. Lau y David P. Bartel en *Investigación y Ciencia*, n.º 325, págs. 6-13; octubre, 2003.

STATUS OF POLLINATORS IN NORTH AMERICA. Nacional Research Council. Nacional Academies Press, 2007.

DECLINE OF BUMBLE BEES (*BOMBUS*) IN THE NORTH AMERICAN MIDWEST. Jennifer C. Grixti, Lisa T. Wong, Sydney A. Cameron y Colin Favret en *Biological Conservation*, vol. 142, n.º 1, págs. 75-84; enero, 2009.

PAGINA OPUESTA: ANDREW SYRED *Photo Researchers, Inc.* (*ácaro* Varroa); CENTRAL SCIENCE LABORATORY *Photo Researchers, Inc.* (*ácaro* Varroa *en larva*); HEIDI & HANS-JURGEN KOCH *Minden Pictures* (*abeja con polen*); CORTESIA DE BARTON SMITH, JR. *USDA Bee Research Laboratory* (Nosema *sp.*); JEN CHRISTIANSEN (*virus paralizante*); EN AMBAS PAGINAS: JEN CHRISTIANSEN (*ilustraciones*)

La realidad de los cuantos

La mecánica cuántica es, desde hace 80 años, uno de los pilares más firmes de la física, aunque su interpretación se ha movido en un debate permanente. Experimentos cada vez más refinados demuestran que el concepto de información posee un significado fundamental en el mundo cuántico, algo que también es de vital importancia para futuras aplicaciones técnicas

Anton Zeilinger

CONCEPTOS BASICOS

- El entrelazamiento constituye un fenómeno cuántico fundamental que no se ajusta a la noción de realidad a la que estamos acostumbrados.
- Los objetos cuánticos entrelazados contradicen la noción de realismo local: antes de una medida, sus propiedades no están definidas de manera unívoca; después, permanecen fuertemente correlacionadas. Clásicamente, esto sólo sería explicable a partir de algún tipo de interacción entre dichos objetos.
- Futuros desarrollos técnicos muy prometedores se basarán en el entrelazamiento cuántico, en particular la criptografía, la comunicación y la computación cuánticas.

Cuando en 1925/26 fue creada la mecánica cuántica moderna, se originó inmediatamente una discusión acerca de su significado. En un famoso debate entre Albert Einstein y Niels Bohr se abordó la siguiente cuestión: ¿proporciona la mecánica cuántica una descripción exhaustiva de la realidad física? Dado que en aquel entonces era técnicamente imposible llevar a cabo experimentos con sistemas cuánticos individuales, un papel central en la controversia lo desempeñaron los experimentos mentales.

Einstein argumentó con una versión cuántica del experimento de la doble rendija, famoso en óptica: un rayo de luz entra desde la izquierda a través de una ranura e ilumina una pantalla con dos rendijas, una de las cuales puede cerrarse a voluntad. Cuando ambas rendijas se encuentran abiertas, se observa en la pantalla un patrón de franjas de interferencia, como corresponde a la naturaleza ondulatoria de la luz. Sin embargo, al cerrar una de las rendijas las franjas no aparecen.

Sabemos, por otro lado, que la luz se compone de partículas (fotones). Einstein se preguntó por el camino seguido por un único fotón. ¿Aparece el patrón de interferencia, tal y como predice la física cuántica, también cuando son fotones individuales los que atraviesan uno tras otro la doble rendija?

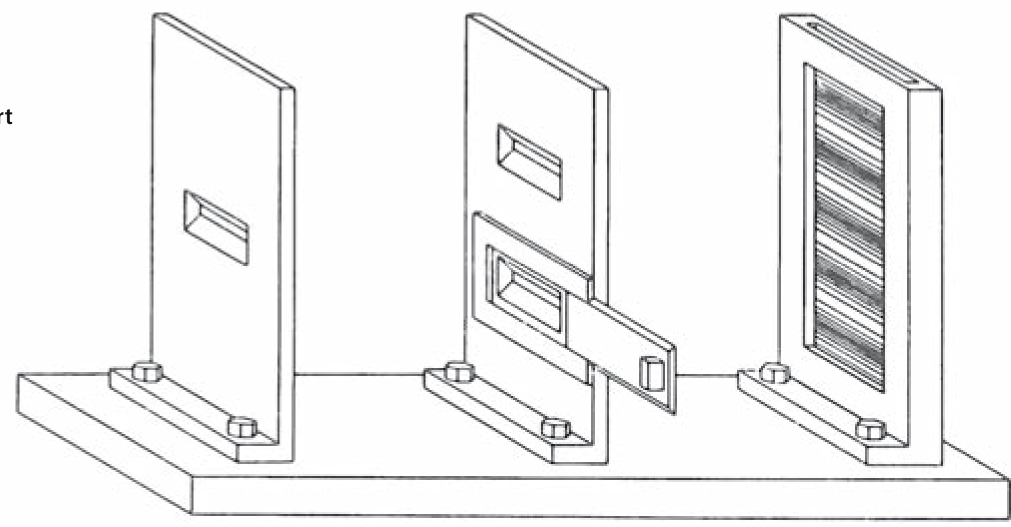
La respuesta de Bohr rezaba así: no tiene sentido hablar de la trayectoria de una sola partícula si no se la ha fijado de antemano (cerrando, por ejemplo, la rendija inferior) o si no se ha efectuado una medición que la determine. Hoy sabemos que las interferencias aparecen si, y sólo si, no existe ninguna información acerca del camino seguido por cada partícula.

Desde los años setenta es posible responder con experimentos a la cuestión de si los patrones de interferencia aparecen o no con partículas individuales. El experimento de la doble rendija ha sido llevado a cabo por el autor y su equipo con distintos tipos de partículas que tienen masa; primero con neutrones y después con fullerenos, moléculas formadas por sesenta átomos de carbono (C_{60}).



1. **EN FISICA CUANTICA** hay entre los objetos relaciones que contradicen de raíz la noción de una realidad separable en ámbitos locales independientes entre sí. Los objetos cuánticos entrelazados se comportan a la manera de dados que, tras cada lanzamiento, ofreciesen un resultado aleatorio, aunque el mismo en cada dado.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT/EMDE-GRAFIK



2. **BOCETO DE NIELS BOHR del experimento de la doble rendija para sus conversaciones con Albert Einstein.**

NIELS BOHR

¿A qué tamaños llega el mundo cuántico?

Cabe preguntarse si todo esto es válido únicamente para las partículas. ¿Qué tamaño puede tener un sistema para que todavía resulte posible observar en él fenómenos de interferencia cuántica? En busca de una respuesta, Erwin Schrödinger concibió en 1935 su famoso gato. En sus propias palabras:

"Se pueden concebir casos completamente disparatados. Enciérrese a un gato en una cámara de acero junto con la siguiente máquina infernal (que debe estar protegida de toda interferencia directa por parte del gato): un contador Geiger contiene una pequeña cantidad de material radiactivo, suficientemente exigua como para que en el transcurso de una hora se desintegre quizás un átomo pero, con la misma probabilidad, quizá no lo haga ninguno; si un átomo se desintegra se disparará el contador, que accionará, por medio de un relé, un pequeño martillo que hará añicos un frasco con ácido cianhídrico. Si se deja este sistema a su aire durante una hora, se diría que el gato aún estará vivo pasado ese tiempo si en su trascurso no se ha desintegrado ningún átomo; en cuanto hubiese habido una desintegración, el animal se habría envenenado. La función de onda del sistema completo pondría este hecho de manifiesto incorporando al gato vivo y al gato muerto mezclados o superpuestos a partes iguales. Lo típico en estos casos es que una incertidumbre, originalmente restringida a la escala atómica, se convierta en una incertidumbre macroscópica que sólo se resuelve mediante la observación directa."

El ejemplo del gato de Schrödinger parece querer decir que no tiene ningún sentido concebir estados cuánticos en sistemas demasiado grandes o complejos. Sin embargo, debemos recordar que las interferencias cuánticas aparecen sólo si no existe ninguna información disponible acerca del camino tomado por la partícula. No se trata de que un observador posea realmente o no dicha información, sino de si es posible, en principio, llegar a averiguar el camino.

Para poder observar interferencias no le debe ser permitido a nadie (dondequiera que se encuentre, y con independencia de lo avanzada que sea la técnica a su alcance) averiguar cuál de los dos caminos ha tomado la partícula. Por otro lado, el sistema ha de estar lo suficientemente aislado, ya que en caso contrario la partícula puede (por ejemplo, mediante emisión electromagnética) informar al entorno acerca del camino tomado, en cuyo caso no hay interferencia.

Es una gran dificultad para el experimentador asegurarse de que no se produce tal fenómeno, denominado decoherencia. Con todo, nosotros hemos conseguido demostrar la existencia de interferencias cuánticas en moléculas de C_{60}; no existe razón por la que no pueda haberlas en sistemas mucho mayores. Ignoramos si llegará el día en que puedan observarse efectos de interferencia cuántica en sistemas vivos, como en el ejemplo de Schrödinger. Habría que separar al ser vivo del entorno para evitar la decoherencia. Quizá podría lograrse con nanobacterias. La posibilidad de llevarlo a cabo con sistemas mayores sigue siendo una interesante cuestión para el futuro.

Paralelamente a los experimentos de interferencia, en los últimos años se ha venido desarrollando internacionalmente una nueva dirección de investigación, que persigue imponer estados cuánticos a pequeños osciladores mecánicos, con un tamaño del orden de magnitud de micrómetros (milésimas de milímetro). Supondría un salto enorme en lo que se refiere a la masa y la complejidad del sistema.

Como hemos mencionado, todo depende de que se posea o no información sobre la rendija por donde ha pasado una partícula.

¿Cómo podemos garantizar que no existe ninguna posibilidad, ni siquiera de principio, de determinar la trayectoria y que, por tanto, aparecerán patrones de interferencia? Que cabe hacerlo así se manifiesta en cierta variante del experimento de la doble rendija; mediante la misma es posible observar los patrones de interferencia de doble rendija generados por pares de fotones estrechamente vinculados entre sí (*véase la figura 3*).

Pares de fotones: ¿ondas o partículas?

En esta sorprendente variante del experimento de la doble rendija, un cristal óptico no lineal genera pares de fotones estrechamente correlacionados entre sí, fenómeno que Schrödinger denominó "entrelazamiento". Antes de llevar a cabo una medida, ninguno de los dos fotones posee un momento bien definido. No obstante, tras haber medido el momento de cada uno de los fotones, la suma de los mismos debe igualar exactamente al momento del fotón a partir del cual se ha generado el par, por lo que es posible determinar con el primer fotón por qué rendija ha pasado el segundo. Sin embargo, esto deja de ser posible cuando la medición efectuada sobre el primer fotón se lleva a cabo de un modo tal, que no permite llegar a una conclusión acerca de la trayectoria tomada por el segundo. ¿Cómo se consigue esto?

El primer fotón queda registrado en un detector colocado en el plano focal de una lente. Tal situación implica una misma proyección del momento para todos los fotones, lo que quiere decir que no existe ninguna información sobre la posición del segundo fotón. Sólo en este caso, cuando se ha borrado la información sobre cada posición, aparecen las interferencias de doble rendija.

El patrón de interferencia se produce únicamente cuando, debido a la medida efectuada sobre el primer fotón, no persiste ninguna información acerca de la trayectoria tomada por el fotón hermano al pasar por la doble rendija. Si no se procede a registrar el primer fotón, las interferencias no aparecen, pues entonces sí se podría utilizar ese primer fotón para conseguir información acerca del camino tomado por el segundo.

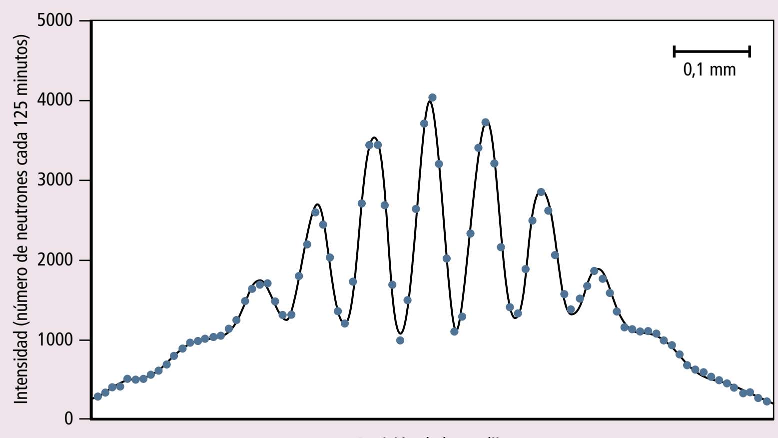
El experimento pone de manifiesto que no puede hablarse de las propiedades de un fotón sin haber llevado a cabo, previamente, el experimento necesario para determinarlas. Aquí la cuestión no sólo depende de haber registrado el fotón que ha atravesado la doble rendija, sino de llevar a cabo el experimento completo; es decir, de registrar también el primer fotón. La clase de medida llevada a cabo determina si el segundo fotón se comporta como una partícula y pasa por una de las dos rendijas, o si, por el contrario, se comporta como una onda y da lugar al patrón de interferencia.

Vemos, en consecuencia, que no tiene sentido (como le hubiera gustado a Einstein) hablar de ondas o partículas como propiedades objetivas e independientes del tipo de experimento llevado a cabo.

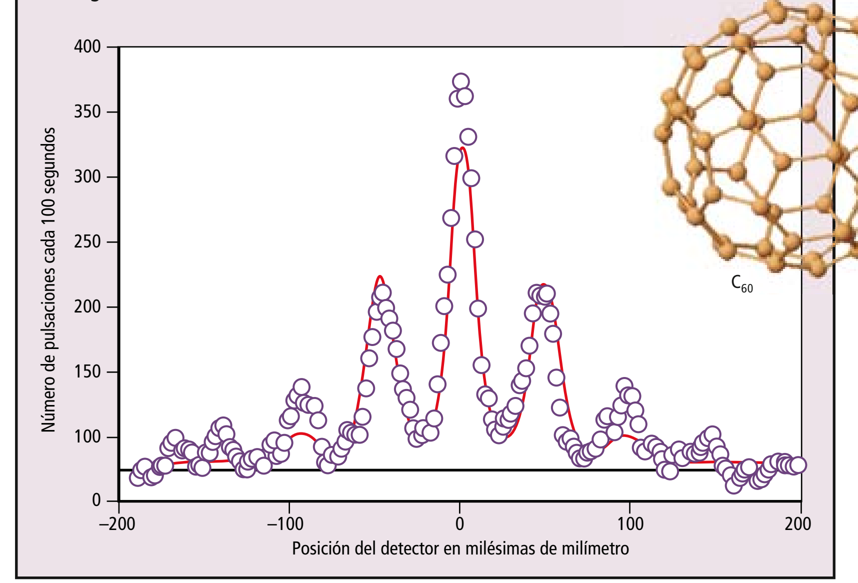
El entrelazamiento entre ambos fotones desempeña una función central en el experimento que acabamos de describir. Este fenómeno fue introducido en 1935 por Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen en su examen de la mecánica cuántica. Curiosamente, durante treinta años su trabajo no recibió más que una

Interferencia de partículas con masa individuales

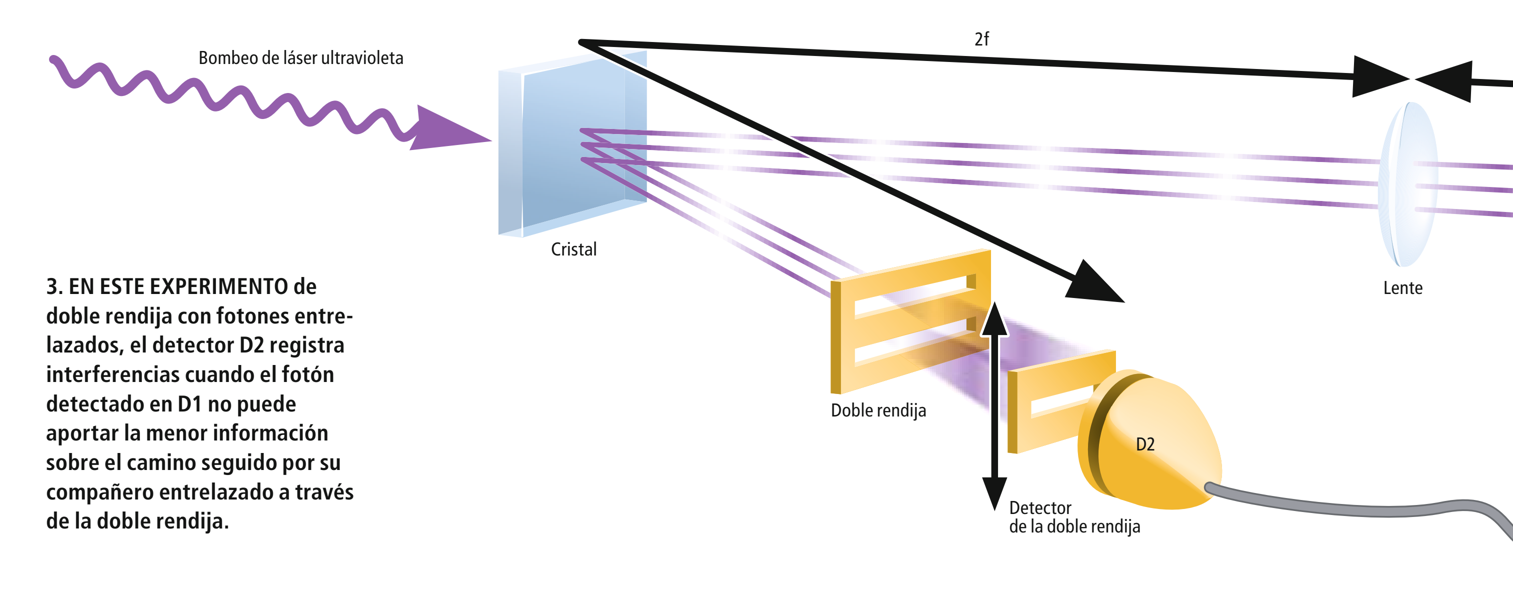
Experimento de doble rendija con neutrones en el reactor de alto flujo del Instituto Laue-Langevin, en Grenoble, realizado en 1988 por un equipo que dirigió el autor. La intensidad era tan baja, que los neutrones pasaban uno a uno por la doble rendija.



Distribución de la intensidad de moléculas de C_{60} tras ser difractadas en una red de absorción con una constante de red de 100 nanómetros (millonésimas de milímetro). También en este experimento, realizado en 1999, cada molécula interfiere únicamente consigo misma.



INSTITUTO ATOMICO DE LAS UNIVERSIDADES AUSTRIACAS, UNIVERSIDAD TECNICA DE VIENA (*arriba*); FACULTAD DE FISICA, UNIVERSIDAD DE VIENA (*abajo*)



3. EN ESTE EXPERIMENTO de doble rendija con fotones entrelazados, el detector D2 registra interferencias cuando el fotón detectado en D1 no puede aportar la menor información sobre el camino seguido por su compañero entrelazado a través de la doble rendija.

El tipo de medida llevada a cabo determina si el fotón pasa como una partícula a través de una sola rendija o si, por el contrario, se comporta como una onda y genera interferencias.

cita anual; hoy en día es citado más de doscientas veces por año. Quien no tardó en reparar en las ideas de Einstein, Podolsky y Rosen fue Erwin Schrödinger, quien acuñó el término “entrelazamiento”. Opinaba que el fenómeno nos obligaba a despojarnos de nuestras ideas recibidas sobre la constitución del mundo.

Para analizar el fenómeno del entrelazamiento atendamos al experimento siguiente: una fuente envía pares de partículas (pares de fotones) hacia dos detectores, que llamaremos A (Alicia) y B (Benito). Lo que se mide en este caso es la correlación entre las polarizaciones de ambos fotones. Los dos polarizadores pueden rotarse en torno al eje del haz, con lo que es posible medir las polarizaciones lineales a lo largo de una dirección escogida a voluntad.

El experimento muestra que, cuando ambos polarizadores presentan la misma orientación, el resultado obtenido es idéntico a ambos lados. Mas, cuando un polarizador queda fijo y el otro es rotado, las coincidencias varían con el doble del ángulo de rotación. Tal y como demostró John Bell (1928-1990), estas observaciones no pueden explicarse a partir de una teoría local y realista.

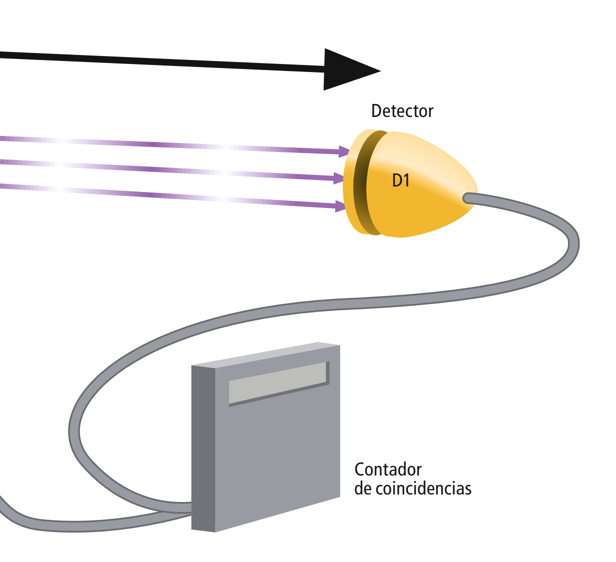
Una teoría local y realista es una descripción de la naturaleza que incorpora dos premisas sencillas. El supuesto de localidad significa que los resultados de una medida efectuados en cierto sitio, digamos en A, no dependen de lo que mida Benito con su detector en B (qué orientación escoge para su polarizador, o tan siquiera si llega o no a realizar una medida sobre su fotón). El supuesto de realidad implica que el resultado de una medida refleja la existencia de propiedades intrínsecas de las partículas, esto es, propiedades que ya existirían antes de efectuar la medida; aquí cabría incluso incluir propiedades del aparato de medición.

Una explicación local y realista parece muy plausible. Efectivamente, cuando ambos polarizadores poseen la misma orientación, se observa siempre el mismo resultado: ambos fotones se encuentran horizontal o verticalmente polarizados. ¿Qué sería, por tanto, más sencillo que suponer que ambos fotones ya “nacen” con dichas polarizaciones? O, al menos, que para ambos fotones queda claro qué polarización deben mostrar tras la medición. Admitido esto y aceptado que el resultado de la medición efectuada sobre un fotón es independiente de lo que le pase en ese momento al fotón que se encuentra lejos, llegamos a la idea de realismo local.

Adiós al realismo local

John Bell postuló que las predicciones estadísticas derivadas de tales suposiciones no eran reconciliables con la física cuántica. Desde los años setenta los experimentos han confirmado con creciente precisión las predicciones de la física cuántica, refutando la imagen local y realista del mundo. La contradicción entre realismo local y mecánica cuántica se extrema en el caso de entrelazamiento entre tres o más partículas, como descubrió, de manera teórica, el autor junto con Daniel M. Greenberger y Michael A. Horne, y como posteriormente demostró experimentalmente el grupo de trabajo del autor (*véase el recuadro* “Del entrelazamiento de pares al estado de Greenberger-Horne-Zeilinger”).

Uno podría, a pesar de todo, suponer la existencia de alguna escapatoria que permitiese salvar la hipótesis del realismo local. ¿Cabría la posibilidad de que el resultado de la medición en un sitio influyese en la medición realizada en otro? ¿Podría ser que el tipo de medida llevado a cabo en un lado se transmitiese, mediante algún mecanismo hasta ahora desconocido, hasta el lado opuesto? Una explicación de este tipo debe descartarse.



En un experimento realizado en 1998 en la Universidad de Innsbruck, Gregor Weihs y otros miembros del grupo del autor cambiaron la orientación de los polarizadores en el último momento; tan deprisa, que ni siquiera una señal que se propagase a la velocidad de la luz habría podido llegar a tiempo al otro lado antes de efectuar la medida sobre el segundo fotón. Nuevamente, las predicciones de la física cuántica fueron confirmadas en detalle.

En consecuencia, la pregunta a formular será: ¿cuál de las dos suposiciones que incorpora el realismo local es falsa? ¿Lo son ambas? Si la premisa de localidad no es válida, tendrían que existir propiedades que se relacionasen entre sí de forma instantánea, esto es, sin ningún retraso temporal a través de largas distancias. ¿O es falsa la premisa de realidad, es decir, la idea de que el resultado de una medición nos informa sobre propiedades que las partículas ya poseen con anterioridad al experimento y con independencia del mismo?

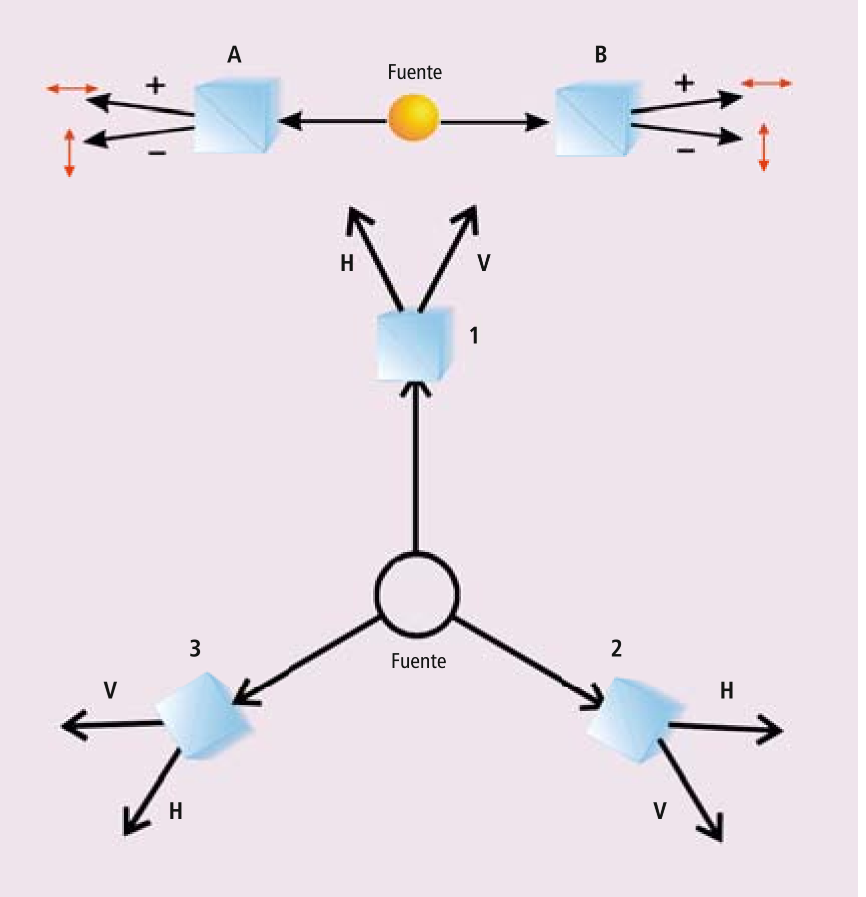
Para responder a la cuestión, Anthony Leggett propuso en 2003 un modelo en el cual los fotones se generan con polarizaciones bien definidas, conforme a la noción de realismo. El modelo de Leggett permite la existencia de interacciones no locales: el resultado de una medición realizada sobre un fotón individual depende de la colocación del polarizador del segundo fotón (instantáneamente y sin ningún retraso temporal a través de distancias tan grandes como se quiera).

Esa premisa de realismo no-local implica, para determinadas mediciones, resultados contradictorios con las predicciones de la mecánica cuántica. Ahí reside su interés. La comprobación es aquí algo más complicada, ya que han de observarse las correlaciones entre las medidas de la polarización lineal en un fotón y de la polarización elíptica en el otro. En nuestro experimento en la Universidad de Viena en 2007, Simon Gröblacher y otros alcanzaron a demostrar que, también en este caso, la mecánica cuántica resultaba correcta. Ni siquiera podía salvarse un realismo del tipo

Del entrelazamiento de pares al estado de Greenberger-Horne-Zeilinger

Para detectar el entrelazamiento entre dos fotones, A (Alicia) y B (Benito) miden las polarizaciones de sus respectivos fotones y comparan los resultados. Ambos polarizadores pueden ser rotados a voluntad en torno al eje del haz.

Los estados GHZ, así llamados en honor a sus descubridores (Greenberger, Horne y Zeilinger), surgen del entrelazamiento de tres partículas. Para determinadas orientaciones de los polarizadores es posible, a partir de las medidas realizadas sobre dos fotones, predecir con absoluta certeza la polarización del tercer fotón: V (vertical) o H (horizontal). Las predicciones de la mecánica cuántica son, en este caso, opuestas a las del realismo local: si la mecánica cuántica exige que un fotón esté polarizado horizontalmente, el realista local llega a la conclusión de que el mismo fotón ha de poseer la polarización ortogonal, es decir, vertical. Los experimentos confirman sin ambages las predicciones de la mecánica cuántica.



FACULTAD DE FISICA, UNIVERSIDAD DE VIENA

Por tanto, la pregunta es: ¿cuál de las dos suposiciones que incorpora el realismo local es falsa? ¿O quizá no sea cierta ninguna?

del propuesto por Leggett, que abandona la hipótesis de localidad.

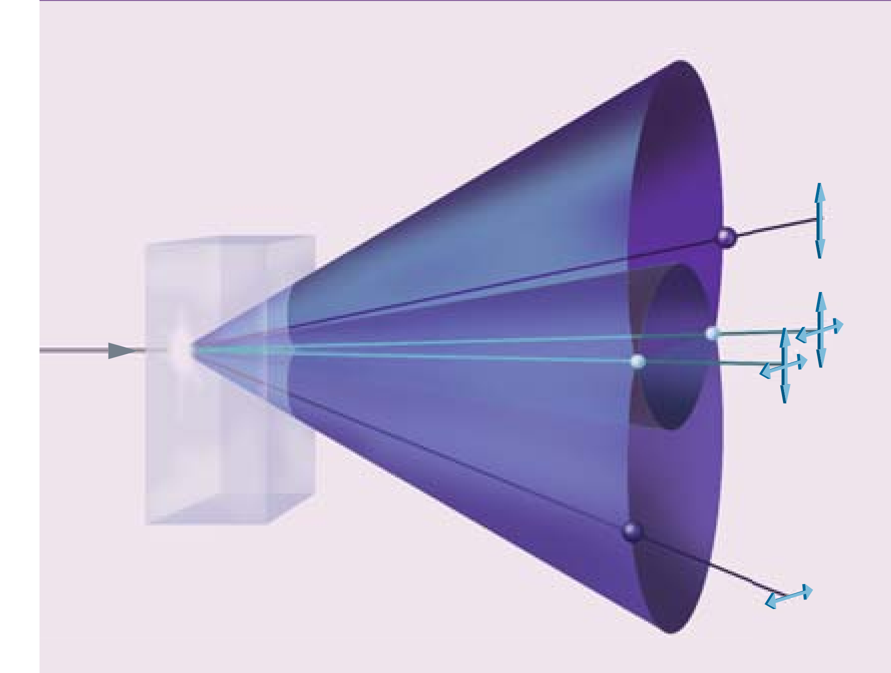
¿Hasta qué distancias se mantiene el entrelazamiento? Para averiguarlo se están llevando a cabo en el grupo del autor una serie de experimentos en las islas de La Palma y Tenerife. En ambas hay grupos de telescopios que, en conjunto, conforman el Observatorio Norte Europeo. Estos experimentos crean en La Palma pares de fotones entrelazados para, posteriormente, enviar un fotón de cada par hacia Tenerife. Allí, un telescopio reflector de un metro de longitud captura los fotones provenientes de La Palma y mide sus polarizaciones, mientras que el fotón complementario de cada par es observado directamente en La Palma. Puede comprobarse que el entrelazamiento se preserva a través de los 144 kilómetros que separan ambas islas, lo que parece indicar que este fenómeno cuántico tiene lugar con independencia de la distancia.

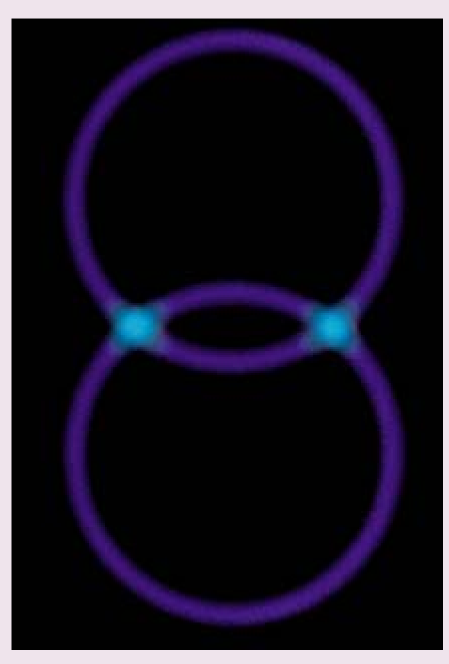
En resumen, si bien es cierto que las mediciones realizadas sobre ambos fotones muestran correlaciones perfectas (con igual orientación de los polarizadores se mide siempre la misma polarización en ambos sitios), debe desecharse por falsa la premisa de que, antes de la medición, los fotones ya poseen cierta polarización. Sólo como consecuencia de la medida realizada sobre el primer fotón, éste adquiere determinada polarización; a partir de ese momento, el segundo fotón posee, con total independencia de cuál sea la distancia interpuesta, una polarización igualmente bien definida.

Alguien podría sospechar que semejante conclusión contradice la teoría de la relatividad de Einstein; de acuerdo con ella, ninguna señal puede propagarse a una velocidad mayor que la de la luz. Pero no es el caso, ya que el resultado de la medición efectuada sobre cada uno de los dos fotones es aleatorio. Vale decir: con independencia de la orientación de los polarizadores, aparece con igual probabilidad el resultado H (horizontal) o V (vertical). De este modo, cuando Alicia y Benito miden la polarización de sus respectivos fotones, no obtienen, a partir de sus resultados, ninguna información sobre la orientación del otro polarizador. Este es, sin embargo, el único parámetro sobre el cual puede influir el experimentador.

Sólo cuando Alicia y Benito comparan sus orientaciones y los respectivos resultados de sus mediciones, pueden constatar las correlaciones. No podemos, pues, recurrir al entrelazamiento para transmitir información, por más que las medidas demuestren que la correlación se da de manera instantánea. Abner Shimony ha hablado, a este respecto, de una coexisten-

¿Cómo se crean fotones entrelazados?





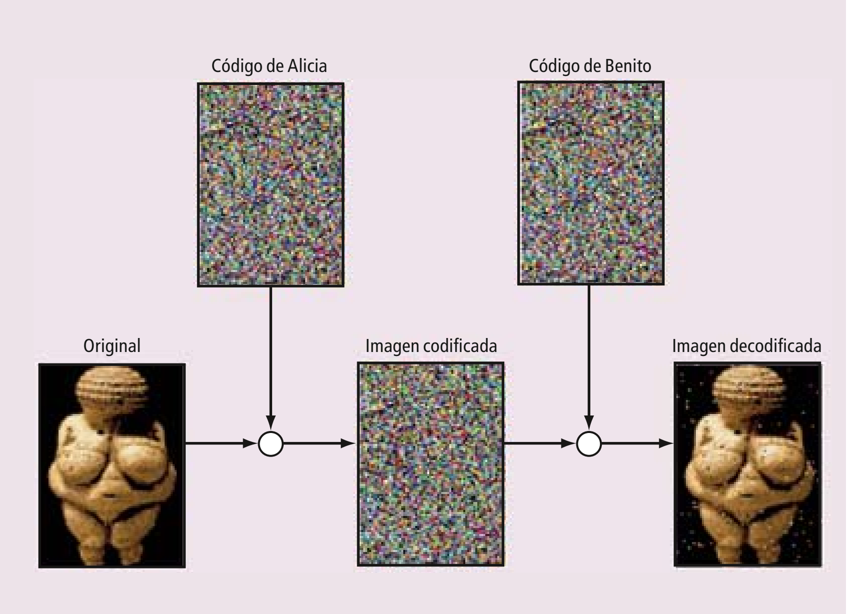
Cuando un rayo láser ultravioleta atraviesa un cristal óptico no lineal, se originan haces de luz con nuevas frecuencias; la suma de sus frecuencias resulta igual a la frecuencia del haz de bombeo. En términos de las partículas de luz, esto quiere decir que un fotón del haz de bombeo puede desintegrarse en dos nuevos fotones, cuyas energías han de sumar lo mismo que la del fotón original.

Los fotones del par creado pueden estar entrelazados entre sí con respecto a sus momentos o a sus polarizaciones. En la figura se producen un fotón verticalmente polarizado (*en el cono superior*) y otro horizontalmente polarizado (*en el inferior*). En la intersección (*en color azul claro*) los fotones tienen sus respectivas polarizaciones entrelazadas.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT Y LAURIE GRACE (*izquierda*); PAUL KWIAT Y MICHAEL RECK, UNIVERSIDAD DE VIENA (*derecha*)

Criptografía cuántica con fotones entrelazados

Con el objeto de transmitir un mensaje codificado cuánticamente, una fuente genera pares de fotones entrelazados y envía cada uno de estos a Alicia y Benito, quienes miden sus polarizaciones. Cuando sus respectivos polarizadores se encuentran igualmente orientados, ambos obtienen el mismo resultado: ambos fotones están polarizados, bien horizontalmente, bien verticalmente. No obstante, para cada uno de los fotones individuales el resultado obtenido es aleatorio. Lo mismo Alicia que Benito obtienen idéntica secuencia aleatoria, que pueden utilizar para codificar un mensaje secreto. Interceptar el mensaje es imposible, ya que Alicia y Benito cambian una y otra vez la orientación de sus polarizadores de manera aleatoria, y con total independencia de lo que hace el otro. En el primer experimento de criptografía cuántica basado en el entrelazamiento, la imagen de la Venus de Willendorf fue codificada por Alicia y posteriormente decodificada por Benito.



cia pacífica entre la física cuántica y la teoría especial de la relatividad.

Del rompecabezas cuántico a la información cuántica

Los experimentos sobre el entrelazamiento, que comenzaron en los años setenta, fueron posibles gracias al desarrollo del láser. Al principio, se excitaba los átomos de manera que devolviesen posteriormente la energía en forma de dos fotones entrelazados. En los experimentos modernos se utiliza fluorescencia paramétrica espontánea. Diez años atrás, había contados laboratorios especializados en la creación de fotones entrelazados; hoy, se ha convertido en práctica rutinaria por doquier. Los generadores han mejorado de tal manera, que tasas de producción de un millón de pares de fotones por segundo ya no son nada fuera de lo común.

En un comienzo, los experimentos se proponían someter a prueba la física cuántica o, al menos, confirmar sus características menos intuitivas. Para sorpresa de los involucrados en esos experimentos, se abrió en los años noventa una línea de desarrollo completamente nueva. Surgió la idea de utilizar el entrelazamiento como una nueva forma de transmisión y procesamiento de la información. Conceptos clave al respecto son la criptografía, el teletransporte cuántico y la computación cuántica.

En el caso de la criptografía cuántica, Alicia y Benito pueden establecer, mediante el uso de fotones entrelazados, una clave secreta para comunicarse entre sí. Alicia puede utilizar la clave para codificar su mensaje, descifrable por Benito (*véase el recuadro* "Criptografía cuántica con fotones entrelazados"). Se trata hoy en día de la aplicación más ampliamente desarrollada en tecnología de la información. La criptografía cuántica constituye el único método conocido hasta ahora que, mediante leyes naturales, evita que un mensaje pueda ser interceptado por terceros. En octubre de 2008 fue presentada en Viena una red de criptografía cuántica en la que participan diversos laboratorios europeos.

En cualquier caso, no cabe duda de que la aplicación más exótica del entrelazamiento es el teletransporte cuántico. Con él resulta posible transmitir, mediante el uso de pares de fotones entrelazados, el estado cuántico de un fotón a otro, y, en principio, a través de distancias arbitrariamente grandes (*véase el recuadro* "Teletransporte cuántico).

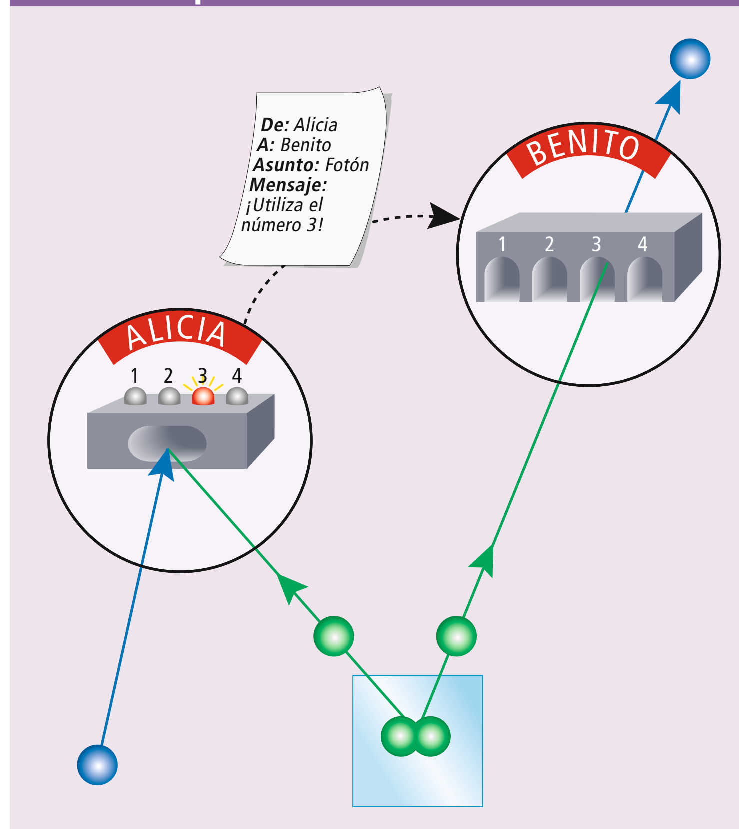
Se contempla, en el teletransporte, un medio ideal de transmisión de información entre futuros ordenadores cuánticos. Un ordenador cuántico viene a constituir la aplicación definitiva de los principios de la mecánica cuántica. La idea básica es la siguiente: a diferencia de lo que ocurre en un ordenador clásico, la información no se almacena por medio de estados clásicos, sino mediante estados cuánticos; por ejemplo, a partir de estados de átomos o fotones, donde distintos estados de excitación de los mismos se corresponden con los diferentes valores que puede tomar un bit. Así entran en juego nuevos principios básicos en lo que respecta al procesamiento de la información.

Un bit clásico toma los valores 0 o 1. El bit cuántico, *qubit*, se da en una superposición

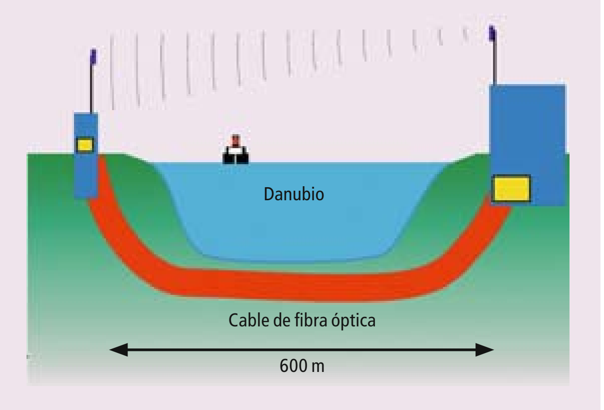
El autor

Anton Zeilinger nació en 1945 en Innkreis (Austria). Estudió matemáticas y física en la Universidad de Viena y se doctoró en 1971 con una tesis sobre física de neutrones. Su nombre aparece asociado al "estado de Greenberger-Horne-Zeilinger". Su grupo consiguió, en el año 2000, reproducir experimentalmente dicho estado GHZ con fotones. Su equipo demostró, además, en el laboratorio, la interferencia cuántica con moléculas grandes. Desde los años noventa investiga con partículas de luz entrelazadas, que utiliza para el transporte de información cuántica. Zeilinger ha sido profesor en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, en la Universidad Técnica de Múnich, la Universidad Técnica de Viena, la Universidad de Innsbruck, la Universidad de Melbourne y en el Collège de France en París. Actualmente es director científico del Instituto de Optica Cuántica e Información Cuántica (IQOQI), así como decano de la facultad de física de la Universidad de Viena.

Teletransporte cuántico



Alicia y Benito generan, en primer lugar, un par de fotones entrelazados (*verde*). Con ello Alicia desea transmitir a Benito el estado de un fotón, que ella desconoce. Con esta finalidad, Alicia entrelaza su fotón (*azul*) con uno de los fotones del par entrelazado. De esta manera, el estado del fotón de Benito queda fijado de manera unívoca en función del estado original del fotón de Alicia. En un experimento, uno de los dos fotones fue enviado desde uno de los márgenes del Danubio hasta el otro (*debajo*). Debido a que el cable de fibra óptica pasaba bajo el Danubio por una alcantarilla, se lo ha llamado "experimento del tercer hom bre", en alusión a la conocida película que, en parte, se desarrolla en las alcantarillas de Viena.



LAURIE GRACE (*izquierda*); FACULTAD DE FISICA, UNIVERSIDAD DE VIENA (*derecha*)

entre 0 y 1. De manera similar al caso de una partícula que atraviesa una doble rendija, para la cual no está fijada la rendija por donde pasa, puede decirse que un qubit toma simultáneamente los valores 0 y 1. Esto, que a primera vista parece implicar una pérdida de certidumbre, permite opciones alternativas novedosas.

Los qubits de un ordenador cuántico, al hallarse entrelazados unos con otros, pueden almacenar, a un mismo tiempo, contenidos de información muy complejos. Un gran número de laboratorios del mundo entero participan ya en una intensa carrera con el fin de desarrollar tales dispositivos. Los bits cuánticos pueden realizarse de diferentes maneras: como átomos o iones retenidos en campos electromagnéticos, como los estados cuánticos de un sólido o incluso mediante fotones.

Al aprovechar el entrelazamiento y la particular capacidad de almacenamiento de datos, los ordenadores cuánticos pueden resolver problemas con celeridad inusitada. Para ejecutar ciertas tareas, por ejemplo la descomposición de números grandes en factores primos, un ordenador clásico necesitaría un tiempo mayor que la vida del universo. Un ordenador cuántico, por el contrario, podría realizar tales tareas muy rápidamente [*véase* "Los límites de la computación cuántica", por Scott Aaronson; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 2008].

Más allá de la física cuántica

Los experimentos sobre computación cuántica han impulsado nuestro dominio sobre los estados cuánticos de sistemas complejos. Hasta hoy, las investigaciones llevadas a cabo sobre cuestiones básicas han tenido que conformarse con el uso de unos pocos qubits; a menudo, sólo dos. Pero los nuevos métodos experimentales abren la puerta al uso de sistemas de varias partículas, lo que habrá de llevarnos hacia nuevos resultados fundamentales.

Los futuros experimentos arrojarán luz sobre la existencia o no de una realidad física completamente independiente del experimento. Aunque el gato de Schrödinger pueda todavía seguir sintiéndose a salvo de convertirse en un objeto de experimentación cuántica, en un futuro próximo la frontera de los fenómenos cuánticos se extenderá en lo que a la masa del sistema se refiere. Es patente que la física cuántica ofrece a nuestro entendimiento cotidiano del mundo dificultades que no se reducen al mundo atómico.

Como toda teoría, la mecánica cuántica podría ser reemplazada un día por otra más profunda. Los experimentos sobre el mundo cuántico preparan el camino.

Bibliografía complementaria

QUANTUM TELEPORTATION ACROSS THE DANUBE. R. Ursin et al. en *Nature*, vol. 430, págs. 849; 2004.

WAVE-PARTICLE DUALITY OF C_{60} MOLECULES. M. Arndt et al. en *Nature*, vol. 401, págs. 680-682; 1999.

TELETRANSPORTE CUANTICO. A. Zeilinger en *Investigación y Ciencia*, n.º 285, págs. 58-67; junio, 2000.

EINSTEINS SCHLEIER. A. Zeilinger. Goldmann; Múnich, 2005.

AN EXPERIMENTAL TEST OF NON-LOCAL REALISM. S. Gröblacher et al. en *Nature*, vol. 446, págs. 871-875; 2007.

EINSTEINS SPUK. A. Zeilinger. Goldmann; Múnich, 2007.

UN FISICO CON ACCION A DISTANCIA. M. Springer en *Investigación y Ciencia*, n.º 379, págs. 65-71; abril, 2008.

El cava

Las bajas temperaturas favorecen la permanencia de las burbujas de gas carbónico en el líquido. Por ello nos gusta tomarlo bien frío

Pere Castells

Según la legislación europea, el término "champán" se ciñe a un vino espumoso que se elabora, mediante el método *champenoise*, en la región francesa de la Champaña. Los vinos espumosos elaborados con este método "tradicional" en otras zonas deben utilizar, por tanto, otras denominaciones. El "cava" corresponde al vino espumoso que se produce, según el método tradicional, en la "región del cava", que engloba varias áreas del norte de España. En Sant Sadurní d'Anoia se concentra más del 70 por ciento de la producción. Los primeros vinos espumosos elaborados en Sant Sadurní con el método de la Champaña aparecieron en el mercado en 1872. Champán y cava se basan, pues, en productos y procedimientos muy similares; en todo caso, la diferencia de climas (continental para el primero y mediterráneo para el segundo) puede afectar a la acidez.

El cava se obtiene mediante una primera fermentación alcohólica de uva, a una temperatura controlada de entre 13 y 18 ºC. Existen distintas variedades de uva para la producción de este vino espumoso. Entre las blancas: macabeo, xarel.lo, parellada, subirat (o malvasía riojana) y chardonnay. Entre las tintas: garnacha, monastrell, pinot noir y trepat.

Para provocar una segunda fermentación (toma de espuma), se añade al vino base azúcar y levaduras; luego se embotella. A esta operación se la denomina "tiraje". Las botellas se almacenan, en las bodegas (cavas), en posición horizontal. Tras esta segunda fermentación y la posterior crianza sobre lías (de 9 meses a varios años), se realiza el "removido", es decir, se conduce el sedimento de levaduras hacia el cuello de la botella, junto al tapón. El siguiente paso es la apertura, o "degüelle", de la botella (expulsión de las lías). La presión hace saltar el sedimento, de modo que el vino queda "brillante" (de aspecto limpio y con reflejos luminosos) y se reduce la presión interior.

Por fin, se añade el licor de expedición (mezcla de vino y azúcar), para obtener los distintos cavas. En función del contenido en azúcar, los clasificamos en: brut nature (sin azúcar añadido), extra brut (hasta 6 gramos de azúcar por litro), brut (hasta 15 g/l), extra seco (entre 12 y 20 g/l), seco (entre 17 y 35 g/l), semiseco (entre 33 y 50 g/l) y dulce (más de 50 g/l).

Expertos de la Universidad de Reims y de Moët & Chandon han estudiado los parámetros que intervienen en la formación de las burbujas carbonatadas; el proceso entraña una gran complejidad [*véase* "Ciencia del champán", por Gérard Liger-Belair, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2003]. También Claudi Mans, de la Universidad de Barcelona, ha ahondado en la química física del dióxido de carbono disuelto. Distingue entre las burbujas y las pompas. La burbuja correspondería al glóbulo de gas, en este caso dióxido de carbono, que se forma en el interior del cava. Cuando una burbuja llega a la superficie del cava, la energía mecánica y la tensión superficial hacen que la superficie quede recubierta de líquido; se transforma, por tanto, en una pompa. Pueden observarse pompas en el aire que rodea la superficie del cava.

AGUSTI TORELLO MATA

Las burbujas de dióxido de carbono convierten el cava en un vino espumoso (*izquierda*). Cuando se añade xantana, un espesante, aumenta la viscosidad del líquido y la permanencia de las burbujas (*derecha*).

En cuanto a la calidad del vino espumoso, reviste suma importancia la permanencia de las burbujas en el líquido. En algunas regiones de gran consumo de cava, como Cataluña, se tiende a beberlo muy frío. Las temperaturas bajas favorecen la permanencia del CO_2. Ello se demuestra mediante un simple análisis termodinámico.

La disolución de CO_2 en un medio acuoso corresponde a un proceso entrópicamente desfavorable (conlleva una pérdida de entropía: $\Delta S < 0$), fenómeno subsecuente a la reordenación molecular que se produce cuando se disuelve un gas en un líquido. Para que el proceso tenga lugar de forma espontánea, la variación de la energía libre de Gibbs (ΔG), que depende de la variación de entalpía (ΔH) y de la variación de entropía (ΔS), debe ser negativa ($\Delta G = \Delta H - T\Delta S < 0$). Por tanto, la disolución del CO_2 debe ser exotérmica ($\Delta H < 0$) y la variación de entalpía ΔH, en valor absoluto, debe ser superior al término $T\Delta S$, también en valor absoluto. La disolución del CO_2 se ve, por tanto, favorecida por una disminución de la temperatura (T).

En fecha reciente se ha desarrollado un método para retener el gas carbónico en el cava, basado en la introducción de goma xantana, un espesante. La xantana es un polisacárido producido por la bacteria *Xanthomona campestris*; su estructura fibrosa aumenta la viscosidad del producto, proporciona elasticidad a las burbujas y atenúa el drenaje y la interacción entre las burbujas. La presencia de la xantana proporciona estabilidad y persistencia al gas; se habla, pues, de cava con dióxido de carbono retenido. Por su elevada viscosidad (superior a la del líquido original), también se le ha venido en llamar "cava sólido", aunque, por supuesto, es líquido.

Pere Castells es el responsable del departamento de investigación gastronómica y científica de la Fundación Alicia.

Bacterias marinas y cambio climático

Oscar Santegoeds, Laia Angel-Ripoll, Dolors Vaqué

En el curso de los últimos 100 años se ha producido un incremento de la temperatura del planeta, debido al aumento de dióxido de carbono (CO_2) antropogénico responsable del efecto invernadero. Las predicciones más optimistas para este siglo estiman incrementos de 2,5 ºC en la superficie oceánica, lo que comportará cambios en el metabolismo y la diversidad de las comunidades planctónicas, que se traducirán, a su vez, en alteración de los flujos de carbono en el mar.

En la base de las redes tróficas microbianas se hallan las bacterias heterótrofas marinas, cuya abundancia ronda el millón por mililitro. Estos microorganismos son los principales responsables de la degradación del carbono orgánico disuelto, ya sea de origen autóctono (excreción del fitoplancton) o alóctono (vertidos antropogénicos). Las bacterias captan esa materia orgánica para su propio metabolismo y reproducción. Respiran una parte importante del carbono y devuelven al medio CO_2, que, en condiciones naturales, es reabsorbido por el fitoplancton. Pero si a un exceso de carbono orgánico alóctono disuelto le sumamos un incremento de temperatura, surgirá un desequilibrio entre el CO_2 producido y el reabsorbido, que revertirá en la retroalimentación del efecto invernadero.

Bastan pequeños incrementos de temperatura para incidir en la diversidad bacteriana, ya sea por el mismo efecto de la temperatura, que propicia la aparición de nuevas especies y la desaparición de otras que no se han adaptado a la nueva situación, o por la competencia con especies más oportunistas.



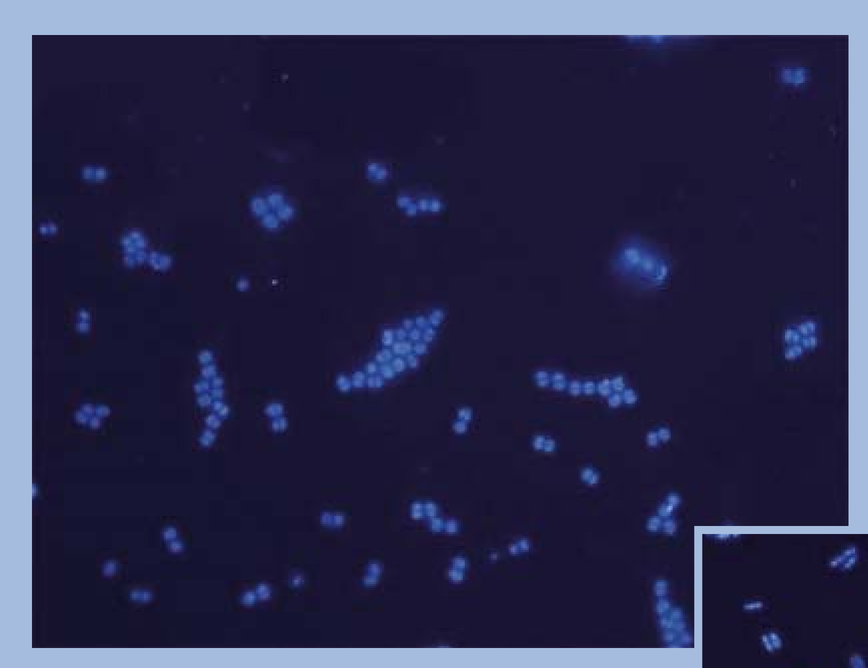
1. Zona costera de la bahía de Blanes, Gerona.

JOSEP MARIA GASOL





2. Colonias de bacterias de una muestra de agua de mar de Blanes. Cuando se incuba la muestra a temperatura ambiente, aparecen cinco colonias que se distinguen por su color y morfología (*izquierda*). Cuando se incuba a 2 ºC por encima de la temperatura ambiente, se forman nueve colonias (*derecha*). (Las colonias comunes en ambos tratamientos se han identificado con los mismos números.)



3. Detalle de la morfología de la colonia amarilla (*1*) que se observa en ambas placas. Observación al microscopio de epifluorescencia.

4. Detalle de la morfología de la colonia blanca (*8*) que se observa en la placa incubada a mayor temperatura. Observación al microscopio de epifluorescencia.

O. SANTEGOEDS

Evolución de la visión de los colores en los primates

El análisis de los pigmentos visuales en los primates demuestra que nuestra visión cromática siguió un curso evolutivo singular y que el cerebro es más adaptable de lo que suele creerse

Gerald H. Jacobs y Jeremy Nathans

CONCEPTOS BASICOS

- La visión de los colores en los seres humanos y otros primates difiere de la de los mamíferos no primates.
- Se denomina tricromacia, ya que depende de tres tipos de pigmentos activados por la luz en la retina del ojo.
- Los análisis de los genes de esos pigmentos aportan información sobre la evolución de la tricromacia a partir de la visión de los colores en los mamíferos no primates, que poseían sólo dos tipos de fotopigmentos.
- Los autores crearon ratones tricromáticos insertando un gen de un pigmento humano en el genoma del ratón. El experimento puso de manifiesto la plasticidad extraordinaria del cerebro de los mamíferos.

Ante nuestros ojos, el mundo se nos presenta con una diversidad infinita de colores, desde el naranja solar de una caléndula hasta el gris oscuro del chasis de un automóvil, desde el azul intenso del cielo invernal hasta el verde centelleante de una esmeralda. Sorprende, pues, que en la mayoría de los humanos todos los colores puedan reproducirse mezclando tan sólo tres longitudes de onda de luz fijas a ciertas intensidades.

Esta propiedad de la visión humana, la tricromacia, se debe a que la retina (la capa de células nerviosas del ojo que captura la luz y transmite la información visual al cerebro) utiliza para la visión de los colores sólo tres tipos de pigmentos que absorben luz. Una consecuencia de la tricromacia es la técnica de la tricromía: las impresoras y las pantallas de los ordenadores y televisores pueden mezclar píxeles rojos, verdes y azules para generar lo que percibimos como un amplio espectro de colores.

Aunque habitual entre los primates, la tricromacia no es una característica general del reino animal. Casi todos los mamíferos no primates son dicrómatas, con una visión de los colores basada en dos tipos de pigmentos visuales. Algunos mamíferos nocturnos poseen un solo pigmento, mientras que ciertas aves, peces y reptiles poseen cuatro y pueden detectar la luz ultravioleta, invisible para los seres humanos. Parece, pues, que la tricromacia de los primates constituye un rasgo insólito. De ahí el interés de conocer su evolución.

Basándose en décadas de estudio, las recientes investigaciones sobre la genética, biología molecular y neurofisiología de la visión de los colores en los primates han aportado resultados inesperados y datos sorprendentes sobre la flexibilidad de su cerebro.

Los pigmentos y su origen

Hace más de 50 años se determinaron las sensibilidades espectrales de los tres pigmentos visuales responsables de la visión de los colores en los seres humanos. Se conocen ya con gran precisión. Cada uno de ellos absorbe la luz de una determinada región del espectro y se caracteriza por la longitud de onda en que la absorción es más eficaz. El pigmento de longitud de onda corta (S, de *small* en inglés) absorbe la máxima luz a unos 430 nanómetros (un nanómetro es una milmillonésima de metro), el pigmento de longitud de onda media (M) lo hace aproximadamente a 530 nanómetros y el pigmento de longitud de onda larga (L), a 560 nanómetros. (A modo de orientación, las longitudes de onda de 470, 520 y 580 nanómetros corresponden a los colores que el ser humano percibe por regla general como azul, verde y amarillo, respectivamente.)

Cada uno de esos pigmentos consiste en una proteína que forma un complejo con un compuesto que absorbe luz derivado de la vitamina A; están situados en las membranas de los conos, neuronas fotorreceptoras de la retina denominadas así por su forma conoidea. Cuando un pigmento absorbe luz, desencadena una cascada de sucesos moleculares que tienen como consecuencia la excitación del cono. Esta excitación activa a su vez otras neuronas de la retina que finalmente transmiten una señal hacia el cerebro a través del nervio óptico.

GEOFFREY CLEMENTS *Corbis (pintura)*; BOB ELSDALE *Corbis (chimpancés)*; LUCY READING-IKKANDA *(fotoilustración)*



1. LOS CHIMPANCES, igual que los seres humanos, pueden apreciar colores que otros mamíferos no distinguen. Lo que se ve en un Kandinsky es un reflejo de las propiedades de las pinturas, el tipo de iluminación y el sistema de visión de los colores del observador.

Aunque se conoce desde hace tiempo el espectro de absorción de los pigmentos de los conos, no fue hasta los años ochenta cuando uno de los autores del presente artículo (Nathans) identificó los genes de los pigmentos humanos y, a partir de las secuencias de ADN de dichos genes, determinó la secuencia de aminoácidos que constituye cada proteína de los pigmentos. Las secuencias génicas revelaron que los pigmentos M y L son casi idénticos. Los experimentos posteriores demostraron que las diferencias de sensibilidad espectral entre los mismos se derivan de sustituciones en tan sólo tres de los 364 aminoácidos por los que está formado cada uno de ellos.

Los experimentos pusieron también de manifiesto que los genes de los pigmentos M y L se sitúan próximos entre sí en el cromosoma X, uno de los dos cromosomas sexuales. (Los varones poseen un cromosoma X y otro Y, mientras que las mujeres presentan dos cromosomas X.) Esta localización no sorprendió en absoluto, dado que se sabía desde hacía tiempo que el daltonismo para los colores rojo y verde, una anomalía corriente en la percepción de estos colores en el hombre, afectaba con mayor frecuencia a los varones que a las mujeres y se heredaba según una pauta que indicaba que los genes responsables residían en el cromosoma X. El gen del pigmento S se localiza en cambio en el cromosoma 7, y su secuencia demuestra que el pigmento S codificado está relacionado sólo ligeramente con los pigmentos M y L.

Hacia mediados de los años noventa, las comparaciones de los genes de estos tres pigmentos con los de otros animales proporcionaron mucha información sobre su origen. Casi todos los vertebrados poseen genes con secuencias muy similares a las del pigmento humano S; ello significa que una versión de un pigmento de longitud de onda corta es un elemento de la visión de los colores desde hace mucho. Entre los vertebrados se hallan también extendidos pigmentos relacionados con los de longitud de onda más larga (M y L), posiblemente bastante antiguos. Pero entre los mamíferos, la presencia simultánea de pigmentos similares a M y L sólo se ha observado en un subgrupo de especies de primates, prueba de una probable evolución de ese carácter hace menos tiempo.

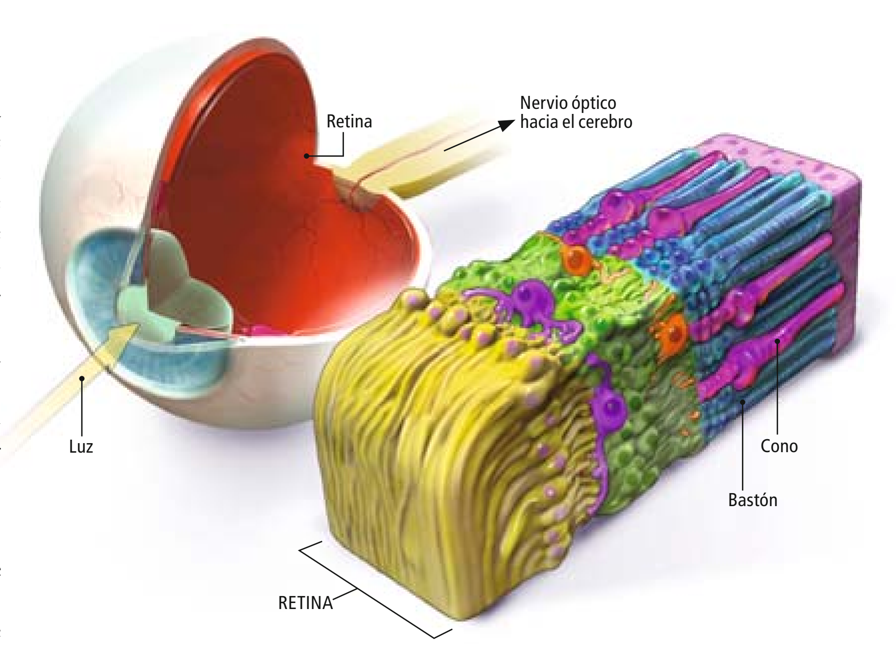
La mayoría de los mamíferos no primates presentan un pigmento de longitud de onda larga, similar a los pigmentos de longitud de onda media y larga de los primates. El gen del pigmento de longitud de onda larga en los mamíferos se aloja en el cromosoma X. Así pues, estos hallazgos plantearon la posibilidad de que

los dos pigmentos de longitud de onda media y larga en los primates aparecieran en el linaje inicial de los primates del siguiente modo: un gen del pigmento de longitud de onda larga se duplicó en un solo cromosoma X; después se produjeron mutaciones en una o ambas copias del gen ancestral ligado al cromosoma X, dando lugar a dos pigmentos bastante parecidos, aunque con distintos intervalos de sensibilidad espectral, los pigmentos M y L.

Un mecanismo conocido en la duplicación de los genes de este tipo es el que opera durante la formación de óvulos y espermatozoides. Cuando las células que dan origen a óvulos y espermatozoides se dividen, algunos pares de cromosomas intercambian una parte de sí mismos en un proceso de recombinación; de vez en cuando, el intercambio desigual de material genético provoca la formación de un cromosoma que posee copias supernumerarias de uno o más de sus genes. Las mutaciones ventajosas introducidas posteriormente en esos genes duplicados pueden entonces mantenerse por selección natural. Es decir, si aumentan la supervivencia, las mutaciones útiles se transmiten a las generaciones futuras y se propagan en la población.

En el caso de la visión de los colores en los primates, cabe suponer que la tricromacia basada en los pigmentos "nuevos" M y L (junto con el pigmento S) confiriera una ventaja selectiva sobre la dicromacia en determinados ambientes. Los colores de la fruta madura, por ejemplo, contrastan frecuentemente con el follaje de alrededor; pero los dicrómatas aprecian menos dicho contraste porque poseen una baja sensibilidad a las diferencias de color en las regiones del rojo, amarillo y verde del espectro visual. Es posible que una mejor capacidad para identificar los frutos comestibles aumentara la supervivencia de los individuos que albergaban las mutaciones responsables de la tricromacia y favoreciera la difusión de esos genes mutantes en la población.

Los mecanismos señalados anteriormente (duplicación génica seguida de mutación y posterior divergencia de las secuencias de ADN) parecerían una explicación razonable de la evolución de los genes de los pigmentos M y L, ya que se conocen otras familias de genes que han experimentado esta serie de acontecimientos. Tómese como ejemplo los genes que codifican las hemoglobinas, proteínas que transportan el oxígeno en la sangre. Los genes de la hemoglobina fetal (producida al inicio del segundo mes en el útero) y los genes de la hemoglobina en los adultos parecen haberse originado como duplicados de un mismo gen ancestral que mutaron más tarde y dieron lugar a variantes con diferentes afinidades por el oxígeno. De igual modo, las inmunoglobulinas, proteínas que intervienen en la respuesta de los anticuerpos del sistema inmunitario, presentan una amplia variedad y surgieron de la duplicación de un gen ancestral.



2. LA RETINA, una capa de neuronas sita en la parte posterior del ojo, transmite la información visual al cerebro a través del nervio óptico. La visión de los colores depende de los conos, células sensoriales conoideas que contienen pigmentos activados por la luz. Los bastones, otras células sensibles a la luz, funcionan con luz tenue y no suelen participar en la visión de los colores. Los bastones y los conos, conocidos en conjunto como fotorreceptores, se ubican detrás de otros tipos de células que contribuyen a la visión.

ANDREW SWIFT

Los autores

Gerald H. Jacobs es profesor investigador del departamento de psicología y del Instituto de Neurociencias de la Universidad de California en Santa Bárbara. Autor de más de 200 artículos y capítulos de libro sobre el sistema visual, ha descifrado el mecanismo genético que dio lugar a la visión tricromática en los primates del Nuevo Mundo. **Jeremy Nathans**, que ha descrito las secuencias de los genes de los pigmentos visuales humanos y la estructura de sus proteínas respectivas, es profesor en los departamentos de biología molecular y genética, neurociencias y oftalmología en la facultad de medicina de la Universidad Johns Hopkins y es investigador en el Instituto Médico Howard Hughes.

Dos líneas evolutivas hacia la tricromacia

Sin embargo, la verdadera historia sobre la evolución de la tricromacia en los primates resulta ser aún más compleja e interesante. Una clave fundamental fue el descubrimiento de que en la visión tricromática de los primates parecen actuar dos mecanismos genéticos distintos: uno en los primates del Viejo Mundo (el grupo que evolucionó en el Africa subsahariana y Asia, integrado por gibones, chimpancés, gorilas y humanos) y otro en los primates del Nuevo Mundo (especies de América Central y del sur, como los tities, tamarinos y saimiris).

El hombre y otros primates del Viejo Mundo llevan los genes de los pigmentos M y L en cada cromosoma X y presentan visión tricromática. Pero uno de los autores (Jacobs), que viene examinando desde hace decenios la visión de los colores en los primates del Nuevo Mundo, descubrió que la tricromacia se producía sólo en un subgrupo de hembras. En las investigaciones, todos los machos y aproximadamente un tercio de las hembras primate del Nuevo Mundo no exhibían sensibilidad a las diferencias de color en las longitudes de onda de media a larga, característica peculiar de los dicrómatas. Se concluyó, pues, que la

tricromacia no era un rasgo general en todos los primates.

Para explicar esta curiosa pauta, varios investigadores estudiaron el número y la disposición de los genes de los pigmentos de los conos en estos simios del Nuevo Mundo. Resultó que la mayoría de las especies poseían un gen de un pigmento de longitud de onda corta (supuestamente localizado en un cromosoma no sexual) y sólo un gen de longitud de onda larga, localizado en el cromosoma X. Dicho de otro modo, la dotación genética de sus pigmentos visuales era comparable a la de los mamíferos dicrómatas. ¿Cómo podían entonces ser algunos de ellos tricrómatas?

La respuesta es que el acervo génico de los primates del Nuevo Mundo incluye algunas variantes (o alelos) del gen del pigmento ligado al cromosoma X, es decir, diferentes versiones con secuencias de ADN ligeramente modificadas. La variación alélica es un fenómeno que afecta a muchos genes, pero las pequeñas disparidades en la secuencia de ADN entre alelos casi nunca se traducen en diferencias funcionales. Sin embargo, en los primates del Nuevo Mundo, los diferentes alelos de los pigmentos ligados al cromosoma X dan lugar a pigmentos con diversas sensibilidades espectrales. Las especies de primates típicas del Nuevo Mundo, por ejemplo los saimiris, poseen en su acervo génico tres alelos del gen del pigmento de los conos ligado al cromosoma X: uno de ellos codifica una proteína similar al pigmento humano M; un segundo, una proteína similar al pigmento humano L, y un tercero, un pigmento con propiedades de absorción de luz más o menos intermedias entre los dos primeros.

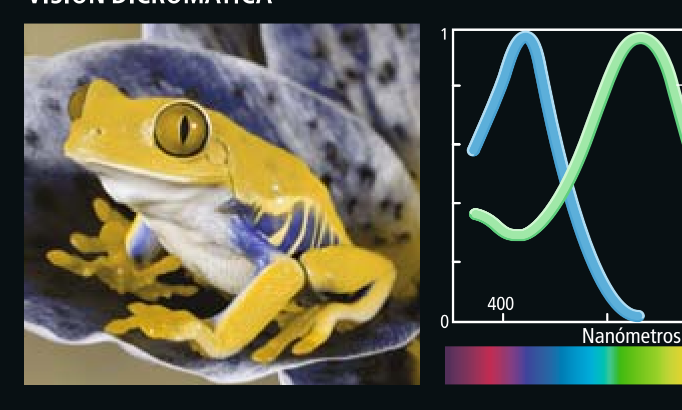
Las hembras de saimiri (y sólo las hembras), al tener dos cromosomas X, pueden heredar dos alelos distintos de longitud de onda larga (cada uno de ellos situado en un cromosoma X), adquiriendo así la tricromacia. No obstante, aproximadamente un tercio de todas las hembras heredarán el mismo alelo del pigmento en ambos cromosomas X y se convertirán en dicrómatas, al igual que todos sus compañeros machos. La tricromacia en los primates del Nuevo Mundo podría interpretarse como una versión defectuosa de la tricromacia generalizada de que disfrutan los primates del Viejo Mundo (*véase el recuadro* "Dos modelos en la visión de los primates").

La disparidad en la visión de los colores entre los primates del Nuevo y del Viejo Mundo ofrece una oportunidad para estudiar la evolución de este rasgo en ambos grupos. Los dos linajes de primates empezaron a divergir hace unos 150 millones de años, con la separación progresiva de los continentes africano y suramericano. Según parece, el aislamiento genético se completó hace unos 40 millones de años. Podría imaginarse que los dos mecanismos de la tricromacia evolucionaron de forma independiente, tras la separación de los linajes del Nuevo y del Viejo Mundo. Ambos grupos podrían haber sido inicialmente dicrómatas, con la dotación estándar de los mamíferos, esto es, un pigmento de longitud de onda corta y otro de longitud de onda larga. El gen del pigmento de longitud de onda larga en los primates del Viejo Mundo podría haberse duplicado y después haber experimentado una divergencia de las secuencias, según lo comentado arriba. En los primates del Nuevo Mundo, el gen del pigmento de longitud de onda larga podría haber sufrido simplemente una divergencia de secuencias, con mutaciones sucesivas que habrían originado diferentes alelos de pigmentos de longitud de onda larga y que persistieron en la población.

Dos tipos de visión de los colores en los mamíferos

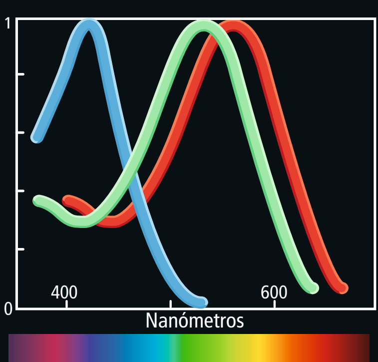
La mayoría de los mamíferos son dicrómatas, ya que su visión de los colores se basa tan sólo en dos tipos de pigmentos visuales (*imagen superior*): uno que absorbe más luz a longitudes de onda corta (*curva azul*) y otro que es más sensible a longitudes de onda largas (*curva verde*). Pero el hombre y otros primates poseen una visión tricromática (*imagen inferior*). Se encuentran capacitados para más colores porque utilizan tres tipos de pigmentos: un pigmento de longitud de onda corta (*curva azul*) y dos tipos de pigmentos de longitud de onda larga (*curvas verde y roja*).

VISION DICROMATICA



VISION TRICROMATICA





¿VENTAJA EVOLUTIVA?

Los colores de la fruta madura contrastan con frecuencia con el follaje de alrededor. Los animales tricrómatas pueden discernir mejor que los dicrómatas tales diferencias. Una manera en que la visión tricromática habría aumentado la supervivencia sería la mayor capacidad de identificar la fruta madura que conferiría, con la consecuente propagación de los genes de la tricromacia en las poblaciones de primates.



GAIL SHUMWAY *Getty Images (ranas)*; JUSTIN LIGHTLEY *Getty Images (frambuesas)*; LUCY READING-IKKANDA *(espectros visibles)*

Dos modelos en la visión de los primates

La base genética de la tricromacia en los primates del Viejo Mundo diverge de la que caracteriza a los del Nuevo Mundo. En ambos grupos existe un gen que codifica un pigmento de longitud de onda corta (*azul*), situado en un cromosoma no sexual. Los primates del Viejo Mundo poseen, además, dos genes de pigmentos de longitud de onda larga (*rojo y verde*) en cada cromosoma X. De ahí que los machos (con un cromosoma X) y las hembras (con dos cromosomas X) presenten tres genes de pigmentos y sean tricrómatas.

En el acervo génico de los primates del Nuevo Mundo existen tres variantes ("alelos") de un gen de pigmento de longitud de onda larga (*rojo, amarillo y verde*) ligado al cromosoma X, pero cualquier cromosoma X lleva tan sólo uno de esos alelos. Como consecuencia, sólo las hembras con alelos de pigmentos distintos en sus dos cromosomas X serán tricrómatas.

		Gen de pigmento de longitud de onda corta	+ Gen (o genes) de pigmento de longitud de onda larga	= Tipo de visión de los colores
PRIMATES DEL VIEJO MUNDO	Macho		*Dos genes de pigmento por cromosoma X* — X; Y — *Sin gen de pigmento en el cromosoma Y*	Visión tricromática
	Hembra		X; X	Visión tricromática
PRIMATES DEL NUEVO MUNDO	Macho		*Un alelo de pigmento por cromosoma X* — X ?; Y	Visión dicromática
	Hembra		X ?; X ?	*Si ambos cromosomas X tienen el mismo alelo de pigmento:* visión dicromática *Si los cromosomas X tienen alelos diferentes del pigmento:* visión tricromática



LOS PRIMATES DEL VIEJO MUNDO evolucionaron en Africa y Asia a lo largo de millones de años. Comprenden simios antropoides (hombre, orangutanes, gorilas, bonobos y chimpancés), así como gibones, langures, macacos y mandriles. El linaje de los primates del Viejo Mundo quedó aislado del linaje del Nuevo Mundo (Centroamérica y Sudamérica) cuando los continentes africano y suramericano se separaron, hace unos 40 millones de años.



◀ MANDRIL

Pero la comparación de las secuencias de aminoácidos de los pigmentos visuales ligados al cromosoma X sugiere que ocurrió algo distinto. En todos los primates del Viejo y del Nuevo Mundo, los pigmentos M comparten un grupo de tres aminoácidos que confieren una sensibilidad espectral máxima a 530 nanómetros; los pigmentos L, otros tres aminoácidos que confieren una sensibilidad espectral máxima a 560 nanómetros. A partir de los estudios del espectro de absorción de otros pigmentos de longitud de onda larga, se sabe que los cambios de secuencia en varios aminoácidos distintos pueden modificar la sensibilidad máxima de esta familia de pigmentos a longitudes de onda más o menos largas. Luego parece improbable que los primates del Nuevo y del Viejo Mundo convergieran de forma independiente en grupos idénticos de aminoácidos para cambiar las sensibilidades de sus pigmentos de longitud de onda larga.

Es más lógico pensar que en el antepasado común de ambos grupos existiera una variación alélica primitiva, parecida a la de los primates del Nuevo Mundo actuales, y que la aparición de la misma representara para ambos la primera etapa del camino hacia la tricromacia (*véase el recuadro* "Evolución de la tricromacia en los primates").

Los distintos alelos de los pigmentos surgieron probablemente a partir de una serie de mutaciones en el gen del pigmento de longitud de onda larga de los mamíferos, algún tiempo antes de que los linajes de los primates del Viejo y del Nuevo Mundo quedaran aislados uno del otro. (Suponemos que el pigmento de longitud de onda intermedia formaba parte de esa dotación primitiva, porque su secuencia de aminoácidos incluye un subconjunto con los tres cambios en la secuencia de aminoácidos que distinguen los pigmentos L y M y porque su espectro de absorción se encuentra a medio camino entre ambos.)

Por consiguiente, después de la separación de los dos grupos de primates se produjo un error inusual de recombinación en una hembra del linaje del Viejo Mundo que resultaba ser portadora de dos alelos diferentes del gen del pigmento de longitud de onda larga. Este acontecimiento excepcional situó un alelo M al lado de un alelo L en un solo cromosoma X, permitiendo que la tricromacia se extendiera a los machos, además de todas las hembras.

Esta novedad genética otorgó una ventaja selectiva tan notable a sus portadores, que los cromosomas X con un solo gen de pigmento de longitud de onda larga terminaron por desaparecer del acervo génico de los primates del Viejo Mundo. Entre los primates del Nuevo Mundo, separados geográfica y genéticamente, persistió el sistema primitivo de tres alelos de longitud de onda larga.

El papel del azar

Otro aspecto sorprendente de nuestros hallazgos en los primates del Nuevo y del Viejo Mundo hace referencia al azar en la tricromacia. No aludimos aquí a las mutaciones genéticas aleatorias que en un principio dieron lugar a la dotación de genes de pigmentos que confieren la tricromacia. Los biólogos han observado que, una vez ha evolucionado un rasgo ventajoso por medio de este mecanismo fortuito, éste suele quedar "grabado" en el

LUCY READING-IKKANDA (*genes*); MAPPING SPECIALISTS (*globo terráqueo*); CYRIL RUOSO *Minden Pictures* (*mandril*)

organismo; es decir, el desarrollo del rasgo en cada individuo está dirigido meticulosamente por procesos celulares que se ajustan a un plan de acción predeterminado. Pero en el caso de la visión de los colores en los primates, los sucesos aleatorios parecen desempeñar un papel importante, si no esencial, en cada organismo e incluso en cada cono que se forma.

Para explicar cómo contribuye el azar a la tricromacia, debemos recapitular primero cómo transmiten los conos al cerebro la información sobre el color. Parece que el hecho de presentar tres tipos de pigmentos, aunque sea necesario para la visión tricromática, constituye sólo una condición inicial. El siguiente paso es el tratamiento neuronal de las señales generadas por distintos fotorreceptores.

Se trata de un paso fundamental. Los conos por separado no pueden transmitir una información concreta sobre una longitud de onda. La excitación de cada fotorreceptor puede ser desencadenada por un intervalo de longitudes de onda diferentes, pero el cono no puede comunicar qué longitud de onda específica ha absorbido dentro de una banda. De este modo, podría emitir una señal del mismo tamaño al ser alcanzado por 100 fotones de una longitud de onda que absorbe de forma eficiente o bien por 1000 fotones de una longitud de onda que absorbe débilmente. Para distinguir un color de otro, el sistema visual debe comparar las repuestas de conos próximos entre sí con distintos tipos de pigmentos.

Para que tales comparaciones sean óptimas, cada cono debe contener únicamente un tipo de pigmento, y los conos con diferentes pigmentos deben situarse cerca uno de otro en una especie de mosaico. De hecho, en la retina de los primates cada cono contiene un solo tipo de pigmento visual; los distintos tipos de conos se combinan en un mosaico determinado. Pero en un tricrómata, cada cono alberga los genes de los tres pigmentos y no está del todo claro cómo un cono "decide" expresar con precisión un solo gen de un pigmento.

Las células activan o expresan sus genes mediante los factores de transcripción: se trata de proteínas especializadas de fijación al ADN que se unen cerca de una región reguladora, el promotor, desencadenando así una serie de sucesos que desembocan en la síntesis de una proteína codificada por el gen. En el caso de los fotorreceptores de longitud de onda corta, parece que durante el desarrollo fetal los factores de transcripción activan el gen del pigmento S. En estas células, un proceso desconocido inhibe también la expresión de los genes de los pigmentos de longitud de onda larga.

Pero interviene otro mecanismo más en la expresión del gen del pigmento en los conos de longitud de onda media y larga de los primates del Nuevo Mundo. El mecanismo en cuestión implica un proceso intrínsecamente aleatorio. En las hembras primates del Nuevo Mundo con distintos alelos en ambos cromosomas X, el alelo expresado por un determinado cono depende de un cara o cruz molecular, la denominada inactivación del cromosoma X. En este proceso, cada hembra inhabilita uno de sus dos cromosomas X al principio del desarrollo. La inactivación del cromosoma X asegura que sólo se exprese un único alelo de un pigmento de longitud de onda media o larga (esto es, se sintetizará un solo tipo de pigmento) en cualquier cono.

Por tratarse de un proceso aleatorio (la mitad de las células expresa genes codificados por un cromosoma X y la otra mitad expresa genes codificados por el segundo cromosoma X), queda garantizado que los conos de longitud de onda media y larga en las hembras de los primates del Nuevo Mundo se entremezclen en toda la superficie de la retina y dibujen un mosaico que permitirá la tricromacia.

La inactivación del cromosoma X, que se produce en todos los mamíferos, constituye una medida fundamental para la supervivencia de las especies. Sin ella, las células de las hembras utilizarían ambos cromosomas X para sintetizar proteínas, lo que causaría diferencias en la cantidad de proteína entre

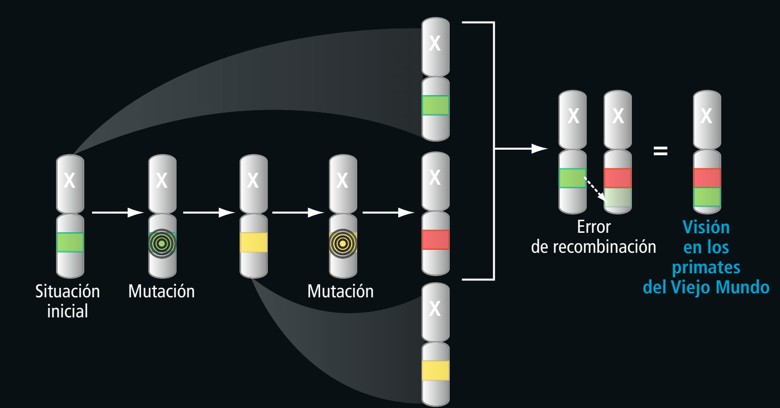


MONO ARAÑA (*Ateles belzebuth*) ▲

LOS SIMIOS DEL NUEVO MUNDO ocupan Centroamérica y Sudamérica y tienden a ser más pequeños que sus parientes del Viejo Mundo. Comprenden especies tales como tities, tamarinos, saimiris, monos araña, monos aulladores y capuchinos.

Evolución de la tricromacia en los primates

La comparación de la base genética de la visión de los colores en los primates del Nuevo y del Viejo Mundo nos revela las fases evolutivas que llevaron a la visión tricromática en algunas hembras del Nuevo Mundo y en ambos sexos de los primates del Viejo Mundo.



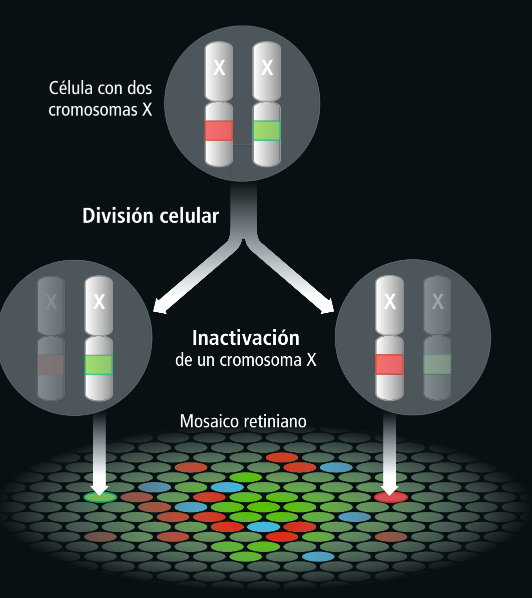
En un antepasado común de los primates del Viejo y del Nuevo Mundo, un gen ancestral del pigmento de longitud de onda larga ligado al cromosoma X (*verde; cromosoma más a la izquierda en la imagen*) experimentó sucesivas mutaciones, con el resultado de tres alelos de pigmentos de longitud de onda larga en el acervo génico (*verde, amarillo y rojo*); estos cambios persisten en los primates actuales del Nuevo Mundo. Tras quedar los linajes de primates del Viejo y del Nuevo Mundo aislados uno de otro, un error de recombinación (intercambio de fragmentos entre los cromosomas durante la formación de óvulos y espermatozoides) en una primate hembra del Viejo Mundo situó juntos dos alelos diferentes en el mismo cromosoma X (*cromosoma más a la derecha en la imagen*). Debido a que esta situación ofreció una ventaja selectiva a los machos y también a todas las hembras, se convirtió en norma en los primates del Viejo Mundo actuales.

LUCY READING-IKKANDA (*genes*); MAPPING SPECIALISTS (*globo terráqueo*); PETE OXFORD *Minden Pictures* (*mono araña*)

Sucesos fortuitos en la retina

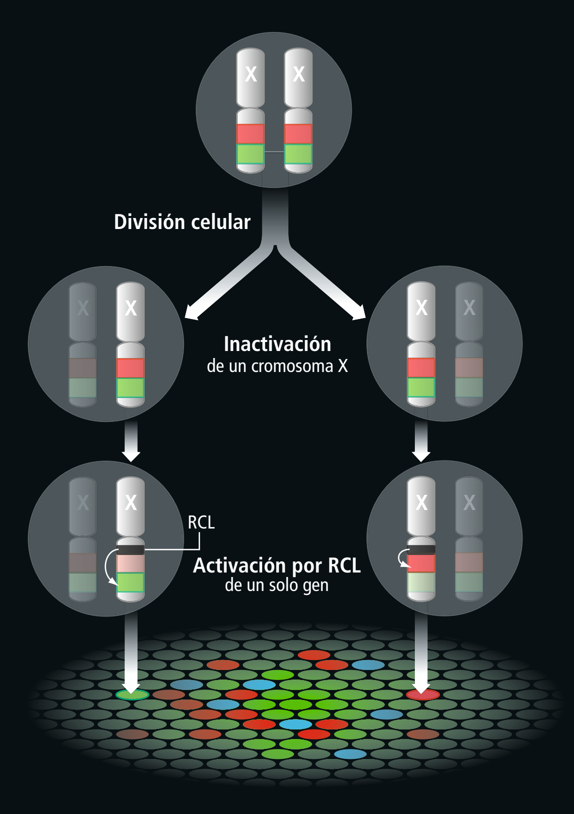
Cada cono contiene genes de los tres pigmentos de color, pero sólo activa uno de ellos e inhibe los otros dos. No se conoce en detalle el proceso que controla la selección del gen del pigmento de longitud de onda corta. Pero el mecanismo que determina la selección de uno de los dos genes de los pigmentos de longitud de onda larga parece ser aleatorio, así como la distribución local en la retina de los tipos de cono de longitud de onda larga (*arriba a la derecha, interpretación realizada mediante ordenador*).

CARA O CRUZ EN EL NUEVO MUNDO



◀ En los primates del Nuevo Mundo, la selección de un gen de un pigmento de longitud de onda larga se consigue mediante la inactivación de un cromosoma X, mecanismo por el que una célula femenina inutiliza uno de sus dos cromosomas X al inicio del desarrollo embrionario. Si la hembra posee diferentes alelos en sus cromosomas X, la inactivación de uno de ellos en cada célula producirá un mosaico de tipos distintos de conos de longitud de onda larga.

EL AZAR EN EL VIEJO MUNDO



◀ Los primates del Viejo Mundo presentan dos tipos de genes de pigmentos de longitud de onda larga en un mismo cromosoma X, por lo que resulta necesario un segundo paso para reducir los tipos de pigmentos a uno por cono. La inactivación de uno de los cromosomas X suprime su acción en las células de las hembras. A continuación, en las células de ambos sexos, un regulador del gen denominado región control del locus (RCL) interactúa al azar con uno de los genes de los pigmentos de longitud de onda larga, activando sólo ese gen y creando de nuevo un mosaico aleatorio de distintos tipos de conos.

ambos sexos y, a consecuencia de ello, se alteraría el desarrollo en uno o ambos sexos. Ahora bien, como los primates del Viejo Mundo poseen ambos genes de los pigmentos M y L en cada cromosoma X, la mera inactivación de uno de los cromosomas no reduce la expresión a un único gen del pigmento por cono en esos animales. Resulta, pues, obligado que en ese caso intervenga otro mecanismo.

Las investigaciones de Nathans indican que, en los primates del Viejo Mundo, la expresión por el cono de uno u otro gen de pigmento, ambos ligados al cromosoma X, está determinada por una secuencia de ADN cercana, la región control del locus. La decisión se toma durante el desarrollo, cuando, en cada cono, la región control del locus interactúa con uno y sólo uno de los dos promotores de los genes contiguos de los pigmentos (sea el pigmento M o el L, pero no ambos) y activa ese gen. Todavía no se han descrito los detalles de la interacción, pero los datos disponibles nos invitan a pensar en la posibilidad de que la elección sea aleatoria.

Si este emparejamiento de la región control del locus con un promotor determina la expresión del gen del pigmento en los conos, y si es realmente aleatorio, entonces la distribución de los conos M y L en cualquier región pequeña de la retina de los primates del Viejo Mundo debería ser también aleatoria. Los trabajos del equipo de David Williams, de la Universidad de Rochester, demuestran la viabilidad de esta hipótesis predictiva, habida cuenta de los límites técnicos de los métodos disponibles para cartografiar la distribución de los conos.

El colorista involuntario

Los estudios que examinan los fundamentos de la visión de los colores en los primates revelan la plasticidad potencial de ciertos mecanismos retinianos y cerebrales involucrados en la visión de los colores de longitud de onda media y larga. Aunque existen circuitos especializados para comparar la información visual de los conos S con la señal combinada de los conos de longitud de onda media y larga, el cerebro y la retina parecen improvisar más cuando comparan las señales de los conos M con las de los conos L. En particular, el sistema visual parece aprender la identidad de esos conos a través de la experiencia, esto es, mediante el seguimiento de las respuestas de los conos a los estímulos visuales.

Y lo que es más, parece que la vía neuronal principal que transmite las respuestas desde estos conos de longitud de onda media y larga ni

LUCY READING-IKKANDA (*genes*); CORTESIA DE DAVID WILLIAMS *Universidad de Rochester* (*retina*)

siquiera se ha especializado en la visión de los colores. Antes bien, la capacidad para extraer información sobre los colores a partir de los conos L y M sería un hecho casual derivado de la existencia de un antiguo aparato neuronal para la visión espacial de alta resolución, que evolucionó para identificar los límites de los objetos y su distancia desde el observador.

John Mollon, de la Universidad de Cambridge, destaca que, en los primates, la visión espacial de alta resolución está regulada por los conos de longitud de onda media y larga; en ella interviene el mismo tipo de proceso neuronal que en la visión de los colores de longitud de onda media y larga; proceso que consiste en una comparación de la excitación de un cono L o M con la excitación promedio de un gran número de conos L y M circundantes. De momento no se ha identificado ningún sistema de circuitos independiente para la visión de los colores de longitud de onda media y larga. Quizá no sea necesario ninguno. Según esta idea, la visión tricromática de los colores puede considerarse una habilidad emergente del sistema de visión espacial preexistente.

La idea de la plasticidad neuronal en la visión de los colores nos lleva a una pregunta fascinante. Imaginamos que el primer paso de la evolución de la tricromacia en los primates fue la emergencia de un segundo alelo de longitud de onda larga ligado al cromosoma X en una hembra, antepasado de todos los primates actuales. ¿Podría el cerebro primate ancestral haber improvisado lo suficiente para "utilizar" el nuevo pigmento inmediatamente, sin desarrollar siquiera unos circuitos neuronales nuevos? ¿Podría ser suficiente la sola adquisición de un tercer pigmento para añadir otra dimensión a la visión de los colores?

Se nos ocurrió que podríamos verificar esta idea si conseguíamos recrear esa etapa inicial de la evolución de la tricromacia en los primates en un mamífero dicrómata (un ratón de laboratorio). Empezamos nuestro experimento con la manipulación genética de un cromosoma X de un ratón, de modo que codificara un pigmento L humano, en vez de un pigmento M de ratón, introduciendo así el tipo de variación alélica que creíamos se había producido en los primates dicrómatas de hace millones de años. A continuación, demostramos que la línea resultante de ratones expresaba el gen humano en sus conos y que el pigmento L humano transmitía las señales de luz con una eficiencia equiparable a la del pigmento M de ratón. Además, los ratones con expresión del pigmento L humano, según cabía esperar, eran sensibles a un intervalo más amplio de longitudes de onda que los ratones sin modificar.

Pero la cuestión principal para nuestros propósitos era: ¿podrían los ratones hembra, con dos genes distintos de pigmentos en los cromosomas X, utilizar el mosaico retiniano de los conos M y L, producidos por la inactivación del cromosoma X, para —además de percibir— discriminar entre colores en este intervalo más amplio de longitudes de onda? La respuesta, corta y extraordinaria, fue que sí.

En las pruebas de laboratorio, entrenamos a hembras con ambos pigmentos M y L para que distinguieran círculos de color verde, amarillo, naranja y rojo, idénticos ante los ojos de los ratones sin manipular. Junto con el nuevo pigmento L, los ratones adquirieron aparentemente una dimensión adicional de la experiencia sensorial, lo que significa que el cerebro de los mamíferos posee la capacidad innata de extraer información a partir de señales visuales nuevas y cualitativamente distintas.

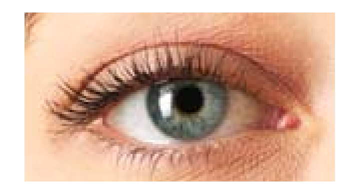
El resultado obtenido comporta implicaciones en la evolución de los sistemas sensoriales en general, ya que indica que los cambios en la entrada del sistema (en los genes de los receptores sensoriales) pueden dirigir la evolución del sistema entero. Con respecto a la tricromacia de los primates, el experimento con los ratones permite también suponer que el primer primate dotado con dos pigmentos distintos de longitud de onda larga percibió un mundo en colores nunca antes visto por un primate.

3. EL RATON MODIFICADO GENETICAMENTE aprende a dirigirse hacia uno de los tres círculos, de distinto color a los otros dos; ello demuestra que puede ver el color naranja, a diferencia de los ratones normales dicrómatas, incapaces de distinguirlo del azul. El ratón ha adquirido semejante destreza porque posee un gen de pigmento humano de longitud de onda larga, además de sus dos genes de pigmentos innatos. El experimento demuestra la notable plasticidad del cerebro de los mamíferos, porque el ratón puede utilizar su nuevo pigmento sin estar dotado de neuronas específicas para la interpretación de sus señales.



KRIS KROGH (*ratón*); GEORGE DIEBOLD *Getty Images* (*ojo*)

¿SUPERDOTADAS PARA LA VISION DE LOS COLORES?



Algunas mujeres poseen cuatro tipos de pigmentos visuales, en lugar de tres. El cuarto pigmento es el resultado de una mutación en uno de los genes de los pigmentos de longitud de onda larga ligados al cromosoma X; se sabe que modifica la sensibilidad espectral de la retina. Se está investigando si esta modificación permite percibir un intervalo más amplio de colores. De momento, las pruebas sobre la visión de los colores no han aportado pruebas sólidas de la visión tetracromática, y los seres humanos con esta capacidad (si es que existen) no necesariamente serían conscientes de su anomalía visual.

Bibliografía complementaria

THE EVOLUTION AND PHYSIOLOGY OF HUMAN COLOR VISION: INSIGHTS FROM MOLECULAR GENETIC STUDIES OF VISUAL PIGMENTS. J. Nathans en *Neuron*, vol. 24, n.º 2, págs. 299-312; octubre, 1999.

GENETICALLY ENGINEERED MICE WITH AN ADDITIONAL CLASS OF CONE PHOTORECEPTORS: IMPLICATIONS FOR THE EVOLUTION OF COLOR VISION. P. M. Smallwood et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 100, n.º 20, páginas 11.706-11.711; 30 de septiembre, 2003.

EMERGENCE OF NOVEL COLOR VISION IN MICE ENGINEERED TO EXPRESS A HUMAN CONE PIGMENT. G. H. Jacobs, G. A. Williams, H. Cahill y J. Nathans en *Science*, vol. 315, págs. 1723-1725; 23 de marzo, 2007.

PRIMATE COLOR VISION: A COMPARATIVE PERSPECTIVE. G. H. Jacobs en *Visual Neuroscience*, vol. 25, n.os 5-6, págs. 619-633; septiembre, 2008.



Turiasaurus riodevensis: el gigante europeo

Rafael Royo Torres, Alberto Cobos y Luis Alcalá

Están apareciendo fósiles de Turiasaurus riodevensis, *dinosaurio saurópodo gigante, en sedimentos de entre 140 y 150 millones de años de antigüedad. El yacimiento se encuentra en España*

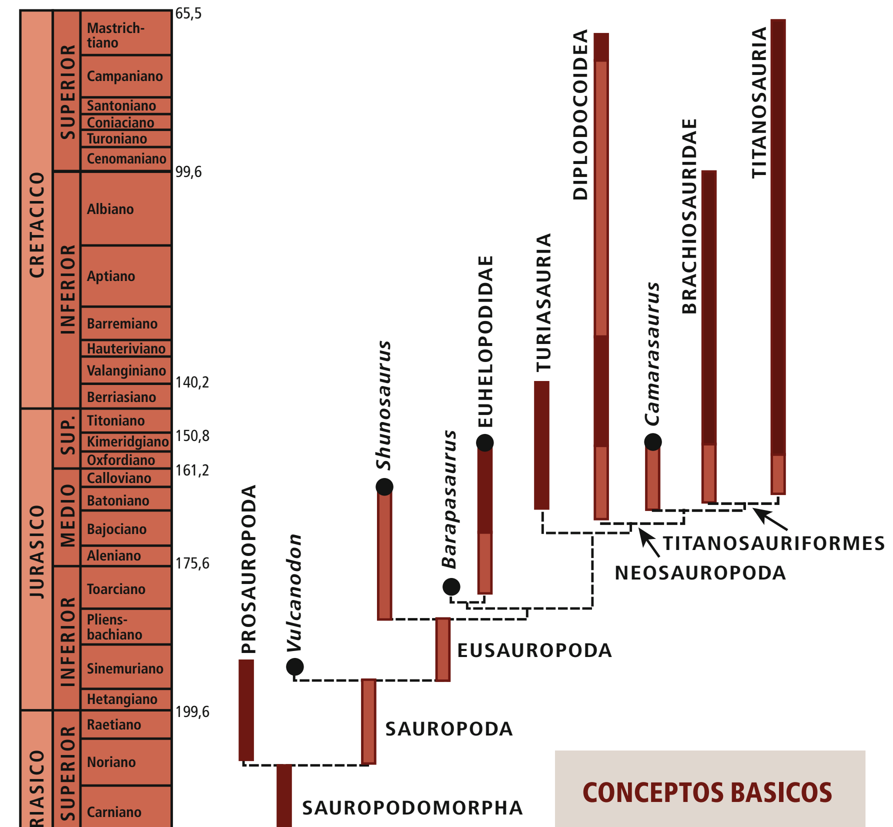
Hasta la fecha, los dinosaurios gigantes habían sido descubiertos en el Nuevo Mundo o en Africa. Algunos ejemplos son los saurópodos *Seismosaurus*, hallado en Estados Unidos, *Argentinosaurus*, en Argentina, *Paralititan,* en Egipto, y *Brachiosaurus*, en Tanzania. Encontrar uno de ellos en Europa y en pleno siglo XXI parecía poco probable. Hallarlo en un pueblo turolense constituyó toda una sorpresa.

Desde hacía más de diez años se tenía constancia de indicios de vertebrados mesozoicos en Riodeva, el pueblo en cuestión. Algunos fragmentos aislados habían aparecido entre los desechos de unas obras de mejora de la carretera de acceso a la población. Cuando en 2002 el equipo de paleontólogos de la Fundación Conjunto Paleontológico de Teruel-Dinópolis comenzó a recopilar la información disponible sobre ese y otros indicios, en el marco de un programa encaminado a conseguir nuevos hallazgos de dinosaurios, Riodeva fue una de las áreas seleccionadas. El 22 de febrero de 2003, al poco tiempo de empezar los trabajos de prospección paleontológica, se hallaron los primeros fósiles significativos: unos centros vertebrales aislados de estegosáurido. En los meses siguientes se recuperaron restos en otros ocho lugares. La zona prometía descubrimientos importantes.

Las labores de campo se vieron recompensadas el 23 de mayo de 2003, día en que se descubrió un nuevo yacimiento, en un paraje denominado "El Humero", junto al Barranco de Barrihonda y apenas a un kilómetro de distancia de Riodeva. En una superficie de unos 100 metros cuadrados había cientos de pequeños fragmentos de huesos fósiles; otros mayores se encontraban integrados en los muros de contención intercalados entre bloques de arenisca y cantos rodados. Fragmentos de una tibia, de un fémur y falanges del pie que parecían haber pertenecido a un gran animal se amontonaban entre cardos y arbustos. Estos indicios bastaron para reconocer el enorme potencial del décimo de los yacimientos registrados (RD-10), al que denominamos Barrihonda-El Humero. Bajo aquel gigantesco rompecabezas de huesos troceados por el paso del arado durante años, ¿podrían



◀ **1. RECONSTRUCCION de *Turiasaurus riodevensis* y de su paisaje.**



▶ **2. CLASIFICACION de los dinosaurios saurópodos y posición del nuevo clado Turiasauria (*derecha*).**

haberse conservado fosilizadas otras partes intactas del esqueleto de un gran dinosaurio?

Una nueva especie

En los yacimientos de dinosaurios suele aparecer material suelto, que apenas permite atribuirlo a un taxón determinado. En el caso del gran dinosaurio de Riodeva se recuperaron numerosos huesos completos de un mismo individuo, que nos facilitaron su asignación a un género y una especie.

Tras el examen de los primeros restos, se determinó que se trataba de un dinosaurio saurópodo; lo avalaba la presencia de rasgos característicos en algunos huesos de las patas posteriores, entre ellos una falange del pie, enorme. La comparamos con una falange similar del dinosaurio *Brachiosaurus,* expuesto en Dinópolis-Teruel; tras observar la desmesurada diferencia de tamaño a favor de la encontrada en Barrihonda, resultaba evidente que estábamos ante un supergigante.

Durante los meses de julio a diciembre de 2003 se desarrolló la primera campaña de excavaciones. Más tarde, como algunos huesos continuaban bajo un talud próximo, fue necesaria la ayuda de maquinaria pesada para retirar la cobertera. Gracias a esto se pudo preparar una superficie de excavación de un tamaño semejante a la de una cancha de baloncesto; así, se recuperaron aún más huesos del animal. La excavación continuó durante 2004-2005. En total se recuperaron varios dientes, seis vértebras del cuello, tres vértebras dorsales, dos vértebras de la cola, restos de la cintura escapular, una pata delantera izquierda completa, —formada por un húmero (de 1,79 metros de longitud), un radio, la ulna (cúbito), un carpal, cinco metacarpos y falanges de la mano—, así como restos de las patas traseras, consistentes en una fíbula (peroné), dos astrágalos, varios metatarsos y algunas falanges de los pies. De manera más fragmentaria se recogieron un sacro, parte de un fémur y una tibia, entre otros elementos.

La información de que se disponía con tal cantidad de huesos fue suficiente para determinar si el animal representaba una nueva especie de dinosaurio o si pertenecía a una ya conocida. Se trata de una especie nueva:

CONCEPTOS BASICOS

- En Riodeva, provincia de Teruel, se ha descubierto uno de los dinosaurios más grande del mundo.
- Se ha determinado que los huesos desenterrados pertenecían a un animal de un género y especie (*Turiasaurus riodevensis*) desconocidos hasta ahora.
- Su masa corporal debía de estar entre las 40 y las 48 toneladas. Parece que sobrepasaba con holgura los 30 metros de longitud (era, pues, el mayor de Europa).
- Vivió en la edad Titónico-Berriasiense, al final del Jurásico y principios del Cretácico.
- El paisaje era por entonces muy diferente del que hoy caracteriza a esa parte de la cordillera Ibérica: una gran llanura sometida a las mareas y surcada por grandes ríos caudalosos que desembocaban en el mar de Tethys.



▲ **2. DETALLE DE LOS METACARPOS de la mano izquierda de *Turiasaurus* en el yacimiento Barrihonda-El Humero.**

▼ **3. RESTOS FOSILES de una costilla y de una vértebra dorsal de *Turiasaurus* durante la campaña de excavación de 2005 en Barrihonda-El Humero.**



la pata delantera izquierda completa servía de holotipo (el elemento conservado en que se basa la definición de la especie) y el resto del material recuperado formaba el paratipo (los elementos que acompañan en esa definición al holotipo). Las características exclusivas del nuevo género y especie se encuentran en sus vértebras dorsales medias, en sus vértebras caudales distales, en las costillas cervicales anteriores y en las patas delanteras y traseras (húmero, radio, ulna, carpal, tibia, fíbula y metatarso V).

Sus características anatómicas y novedades evolutivas se publicaron en la revista *Science* del 22 de diciembre de 2006. Al espécimen se le denominó *Turiasaurus riodevensis*. El género *Turiasaurus* se tomó de "Turia", palabra relacionada etimológicamente con Teruel y que da nombre a su río, y de *sauros*, término griego que significa lagarto. El nombre de la especie se refiere a Riodeva, donde se encuentra el yacimiento.

La edad del dinosaurio

Uno de los problemas que hubo que resolver fue la edad geológica del yacimiento. La zona no había atraído hasta entonces la atención de los científicos. La información disponible se restringía al Mapa Geológico Nacional y a dos publicaciones bastante recientes. Los trabajos en cuestión, realizados por investigadores de la Universidad de Stuttgart, asignaban a los sedimentos un intervalo de edad muy amplio; abarcaba todo el Cretácico Inferior (entre hace 146 y 100 millones de años). Tras meses de trabajo se perfilaron columnas estratigráficas (dibujos de la sucesión vertical de rocas del yacimiento) y se estudió la microfauna de los niveles fosilíferos. Toda esta información se comparó posteriormente con las diferentes formaciones geológicas descritas en la cordillera Ibérica.

Lo primero que se observó fue que los niveles donde se encontraban los dinosaurios se situaban por encima del Jurásico Superior marino. Esto indicaba un cambio gradual, en el que las rocas calizas de origen marino dejaron paso a medios cada vez más continentales, representados por sedimentos arenosos y arcillosos. El yacimiento Barrihonda-El Humero se encontraba en rocas de la Formación Villar del Arzobispo (de edad Titónico-Berriasiense, entre hace unos 151 y 140 millones de años, al final del Jurásico y principios del Cretácico), que en Riodeva se caracteriza por alcanzar un gran espesor y presentar pocos niveles carbonatados.

Como la microfauna encontrada por debajo de los yacimientos de dinosaurios contiene al foraminífero *Anchispirocyclina lusitanica*, que aporta información acerca de la edad absoluta de las capas que lo contienen, y como además se ha podido correlacionar la sucesión estratigráfica de la parte superior (techo) del afloramiento, se calcula que el dinosaurio vivió entre hace unos 143 y 147 millones de años, intervalo en el que se incluye el límite Jurásico-Cretácico.

El lugar donde vivió

El estudio geológico de los sedimentos aporta datos relevantes acerca de cómo era el ambiente donde quedó enterrado el dinosaurio. Los sedimentos con fósiles están formados por estratos de notable espesor, compuestos por arcillas rojas y grises, con presencia de paleosuelos entre los que se intercalan grandes capas de areniscas blancas y amarillentas. Estas capas incluyen a veces en su base limos

TERUEL, TERRITORIO DE DINOSAURIOS

El hallazgo de dinosaurios en la provincia de Teruel no es nuevo. *Turiasaurus* forma parte de una larga lista de descubrimientos paleontológicos que, desde el siglo XVIII, atrae hasta el sur de Aragón a paleontólogos de toda Europa. La primera mención a dinosaurios en España, se remonta a 1872, cuando Juan Vilanova Piera (1822-1893) notificó el hallazgo de *Iguanodon* en la localidad de Utrillas. Sin embargo, esta temprana mención no tuvo continuidad inmediata y, salvo excepciones, como la referencia de José Royo y Gómez en 1918 a restos procedentes de Mora de Rubielos, no se comenzó a estudiar de forma sistemática a los dinosaurios ibéricos hasta el último cuarto del siglo XX. Entre las nuevas especies de dinosaurios definidas en Teruel destaca *Aragosaurus ischiaticus* (descubierta en Galve y descrita en 1987 por José Luis Sanz y colaboradores), ya que supuso el primer dinosaurio definido en España. El último dinosaurio en sumarse a la lista ha sido *Tastavinsaurus sanzi* y otros están a la espera de ser publicados.



Pero los huesos no son los únicos restos de dinosaurios que se encuentran en Teruel; también hay fósiles de huevos, como el ootaxón *Macroolithus turolensis*, procedente de Galve y publicado por Olga Amo y colaboradores en el año 2000, que se ha relacionado con dinosaurios carnívoros similares a *Oviraptor* de Mongolia. Igualmente, y de edades geológicas muy dispares, hay yacimientos de huellas de dinosaurios producidas por saurópodos, tireóforos, terópodos y ornitópodos. Cabe destacar que varios de estos yacimientos se encuentran en localidades que también presentan huesos fósiles, por lo que el interés científico se amplía considerablemente al disponer de una mayor información sobre restos directos e indirectos en las mismas formaciones geológicas.

Entre los yacimientos de icnitas destacan Las Cerradicas, en Galve, con huellas del ornitópodo cuadrúpedo más pequeño registrado en el mundo, y El Castellar, en la localidad del mismo nombre, donde entre las más de 800 icnitas reconocidas existe un rastro producido por un carnívoro de más de nueve metros de longitud. Resulta significativo, además, que en varios de estos afloramientos se conservan enormes huellas subcirculares y en forma de media luna (*fotografía*) producidas por los pies y las manos de saurópodos de gran talla, como *Turiasaurus* u otras especies coetáneas, de hace unos 145 millones de años.

Un aspecto reseñable del registro fósil turolense es que abarca un amplio abanico temporal, ya que existen restos desde el Jurásico Superior, hace 150 millones de años, hasta el Cretácico Superior, poco antes de la extinción de los dinosaurios en el límite Cretácico-Terciario, hace unos 65 millones de años.

laminados con restos vegetales, moldes de bivalvos, gasterópodos y otros. Menos frecuentes son los niveles de oncolitos (estructuras sedimentarias que incluyen concreciones esféricas creadas por cianobacterias) con presencia de ostreidos (ostras), lo que indica una clara influencia marina.

A partir de estos datos sabemos que el paisaje fue muy diferente del que hoy define a esa parte de la cordillera Ibérica: una extensa llanura sometida a la influencia de las mareas y surcada por ríos caudalosos que desembocaban en el mar de Tethys (germen del actual mar Mediterráneo). Además, una abundante vegetación conformaría un lugar adecuado para mantener a los protagonistas de la época, los dinosaurios.

Un nuevo linaje

Los dinosaurios saurópodos, entre los que se cuenta *Turiasaurus riodevensis*, son cuadrúpedos, dotados de largos cuellos y colas. Por las características de sus dientes, con facetas de desgaste, sabemos que eran de hábitos fitófagos; se alimentaban de hojas de arbustos y árboles.

La clasificación de los saurópodos ha ido variando en los últimos diez años. Se ha pasado de un número restringido de "familias" a una cifra notable de clados (agrupaciones formadas por todas las especies que comparten un antepasado evolutivo común). Los saurópodos pueden dividirse en dos grandes grupos: los eusaurópodos basales y los neosaurópodos. Los primeros presentan caracteres primitivos y los segundos reúnen formas derivadas, entre las que se encuentran también los individuos de mayor porte (*Seismosaurus*, *Brachiosaurus* y *Argentinosaurus*).

Los caracteres del esqueleto de *Turiasaurus riodevensis* lo sitúan entre los saurópodos no neosaurópodos: la estructura interna del hueso sin cavidades en vértebras y costillas, una relación del radio con el metacarpo más largo (McII) de 0,369, una fórmula de las falanges (el número de falanges por cada dedo) de la mano de 2-2-2-2-¿? y el extremo proximal de la tibia comprimido mediolateralmente. *Turiasaurus* constituye la muy notable novedad de ser el primer saurópodo gigante incluido entre los eusaurópodos basales. Según el análisis filogenético, está situado dentro de un nuevo grupo al que aporta su nombre, Turiasauria, junto con *Losillasaurus* de Losilla de Aras (Valencia), y *Galveosaurus* de Galve

DINOPOLIS. UNA GRAN ENCICLOPEDIA SOBRE LA HISTORIA DE LA VIDA EN LA TIERRA

En 2001 abrió sus puertas al público el primero de los edificios del proyecto Dinópolis, que hoy cuenta con un importante complejo paleontológico en la ciudad de Teruel y cinco secciones distribuidas por la provincia, en lugares significativos desde un punto de vista paleontológico: Peñarroya de Tastavins, Galve, Rubielos de Mora, Albarracín y Castellote, así como un centro asociado en Mas de las Matas. A las facetas propias de difusión que se realizan a través de sus exposiciones (visitadas ya por más de 1,3 millones de personas) y de sus programas públicos, se suman las tareas de conservación de colecciones y de yacimientos, así como de investigación, propias de un museo paleontológico.

Los autores

Rafael Royo Torres, Alberto Cobos y **Luis Alcalá** son paleontólogos de la Fundación Conjunto Paleontológico de Teruel-Dinópolis. Royo Torres es doctor en ciencias geológicas por la Universidad de Zaragoza y especialista en dinosaurios saurópodos. Cobos se formó como geólogo en la Universidad del País Vasco e investiga en la utilización de la paleontología como factor de desarrollo. Alcalá es doctor en ciencias geológicas (paleontología) por la Universidad Complutense de Madrid y ha sido Conservador de Paleontología y Vicedirector de Exposiciones y Programas Públicos en el Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC).

Agradecimientos al Gobierno de Aragón y proyecto Valdinotur CGL 2006-13903-BTE.



▲ **4. DIENTE de *Turiasaurus riodevensis*.**

(Teruel), con los que comparte numerosos caracteres diagnósticos.

La distribución geográfica y estratigráfica precisa de este nuevo clado es una de las tareas a determinar en el futuro, pero todo indica que Turiasauria representa una radiación que se originó en Europa antes del Titónico (Jurásico superior). El estudio comparado de los dientes ha permitido también identificar material fragmentario procedente de otros yacimientos europeos, lo que hace pensar que corresponden al nuevo clado. En Francia se han descrito dientes de *Neosodon,* dinosaurio que comparte con los dientes de *Turiasaurus* la constitución de sus coronas en forma de corazón. Un diente similar fue localizado en el Museo Geológico en Lisboa, y un diente asignado al género *Cardiodon*, del Jurásico Medio de Inglaterra, presenta coincidencias en su descripción. Los dientes de *Neosodon* son más altos que los de *Turiasaurus* y más angostos en sentido labiolingual. Con *Cardiodon* ha sido imposible realizar una comparación directa porque el diente descrito a mediados del siglo XIX por Richard Owen permanece en paradero desconocido.

En cualquier caso, se ha demostrado la presencia de un linaje desconocido hasta la

EN EL CONTEXTO DE LA PENINSULA IBERICA

El registro de dinosaurios saurópodos en la península Ibérica presenta una alta diversidad, con ocho especies propias descritas y un número abundante de grupos representados. Durante el Jurásico Inferior y Medio, la península formaba parte del supercontinente Pangea. Entonces predominaban los saurópodos basales y eusaurópodos no neosaurópodos. Los datos más antiguos de dinosaurios saurópodos de España se encontrarían en el Sinemuriense de Soria, identificados por icnitas en forma de media luna asignadas, con dudas, a manos de saurópodos. En el Calloviense (Jurásico Superior), el supercontinente Pangea comenzó a fragmentarse en dos: Laurasia al norte (Norteamérica, Europa y Asia) y Gondwana al sur (Sudamérica, Africa, India, Australia y Antártida). Se experimentó luego un máximo en la diversidad mundial de dinosaurios saurópodos en torno al tránsito Jurásico-Cretácico. En la península Ibérica se han descrito, además de los tres géneros españoles de Turiasauria, restos portugueses de diplodocoideos (*Dinheirosaurus*), macronarios (*Lourinhasaurus*) y titanosauriformes (*Lusotitan*).

El siguiente intervalo significativo con restos de saurópodos pertenece al Cretácico Inferior (Hauteriviense-Aptiense). La península Ibérica, en dicho momento, formaba parte de una serie de archipiélagos con posibles conexiones esporádicas con Africa, Norteamérica y Asia. Los diplodócidos fueron reemplazados por los rebaquisáuridos, los turiasaurios se habrían extinguido y dominarían los Titanosauriformes basales, de los que abundan restos en la cordillera Ibérica. Algunos taxones que han sido reconocidos a partir de dientes aislados, como *Oplosaurus armatus* y "*Pleurocoelus*" *valdensis*, indican una relación geográfica con el Reino Unido y Asia, donde se encontraron los primeros euhelopódidos.

Durante el Cretácico Superior, el único grupo de saurópodos representado es el de los titanosaurios. Se han recuperado huesos, icnitas y huevos. En el Campaniense se describen formas de un titanosaurio pequeño, *Lirainosaurus astibiae*, definido en el Condado de Treviño (Burgos). Y del Maastrichtiense se citan titanosaurios de gran tamaño del Pirineo a partir de huesos y yacimientos de huellas.

MAPA DE EXCAVACION: BARRIHONDA-EL HUMERO
RIODEVA (TERUEL) 2005

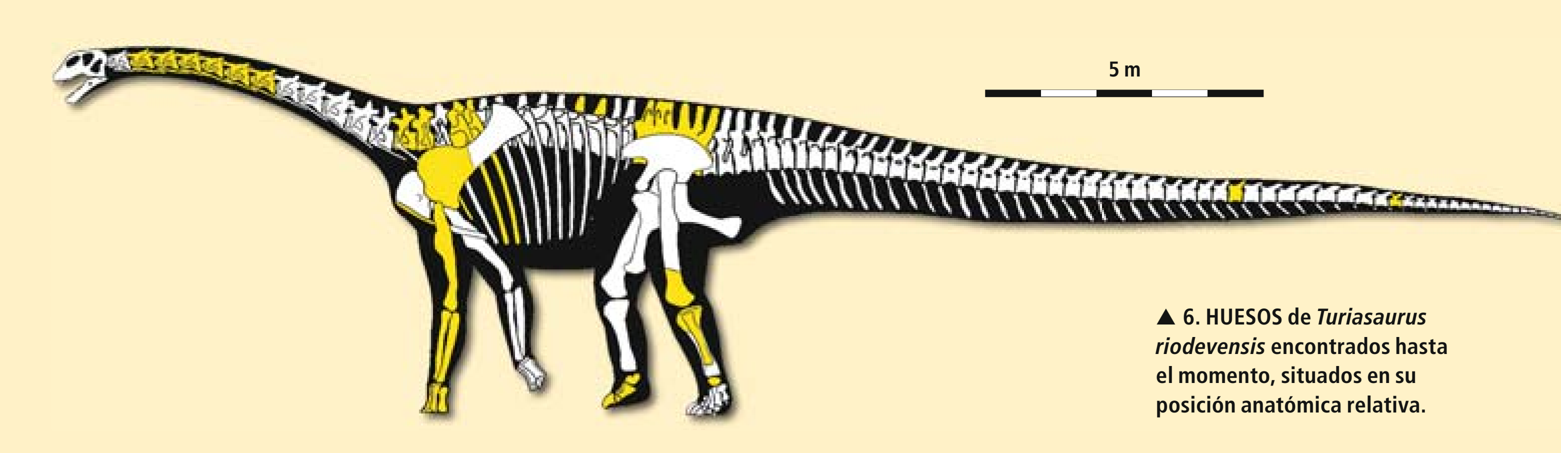
Lista de huesos de *Turiasaurus*

1 Falange ungueal
2 Vértebra cervical
3 Vértebra cervical
4 Vértebra cervical
5 Vértebra cervical
6 Vértebra cervical
7 Vértebra cervical
8 Costilla dorsal
9 Dos vértebras dorsales
10 Costilla dorsal
11 Dientes
12 Vértebra caudal
13 Vértebra caudal
14 Costilla dorsal
15 Costilla dorsal
16 Costilla dorsal
17 Astragalo
18 Radio
19 Costilla dorsal
20 Falange del pie
21 Ulna
22 Húmero
23 Metacarpo
24 Metacarpo
25 Metacarpo
26 Metacarpo
27 Metacarpo
28 Escápula
29 Fíbula
30 Sacro
31 Indeterminado
32 Costilla dorsal
33 Vértebra dorsal
34 Vértebra dorsal
35 Costilla dorsal
36 Vértebra dorsal
37 Falange
38 Esternal
39 Falange ungueal de la mano
40 Falange de la mano
41 Falange de la mano
42 Falange de la mano

20 cm

0 50 100 200 cm

▲ 5. PLANO DE EXCAVACION del yacimiento Barrihonda-El Humero.



▲ 6. HUESOS de *Turiasaurus riodevensis* encontrados hasta el momento, situados en su posición anatómica relativa.

fecha, del que había restos de dientes dispersos por Europa que se habían estado catalogando como Sauropoda *incertae sedis*. Así, gracias al hallazgo de gran cantidad de material fósil de *Turiasaurus riodevensis*, se ha podido proponer que otros dinosaurios, como *Losillasaurus*, *Galveosaurus*, *Neosodon* y *Cardiodon*, forman parte de un grupo común, el clado Turiasauria.

▼ **7. PATA DELANTERA izquierda de *Turiasaurus riodevensis*.**



Peso y talla

Turiasaurus riodevensis, el primer eusaurópodo basal (es decir, primitivo) gigante encontrado hasta la fecha en el mundo, desarrolló una masa corporal de entre 40 y 48 toneladas; al parecer, sobrepasaba con holgura los 30 metros de longitud. ¿Cómo se ha podido obtener esta información?

Con el paso del tiempo, las estimaciones de la masa corporal de los dinosaurios saurópodos han variado. Diríase que "han encogido". Así, por ejemplo, un saurópodo de 24 metros de longitud como *Brachiosaurus* ha ido perdiendo peso paulatinamente según se empleaban procedimientos cada vez más ajustados. Desde los primeros trabajos publicados en 1962, en los que se le atribuían 78 toneladas, se ha pasado hoy a unas 30 o 40 toneladas, e incluso menos de 30, según los autores. Para calcular el peso de *Turiasaurus* escogimos uno de los métodos más conservadores, el propuesto por Anderson y colaboradores en 1985; a tenor del mismo, *Brachiosaurus* pesaría 29 toneladas. Los cálculos obtenidos con ese método, que se basa en las dimensiones de la circunferencia menor de la diáfisis del húmero y del fémur, indican que *Turiasaurus* pesaba entre 40 y 48 toneladas.

Al ser Turiasauria un nuevo linaje de dinosaurios, resultó complicado establecer comparaciones directas de las proporciones del esqueleto con las de otros saurópodos. Por un lado, el tamaño de los elementos anatómicos de *Turiasaurus* resulta equiparable al de los mayores saurópodos conocidos. Por ejemplo, el húmero de *Turiasaurus* mide 1790 milímetros de longitud, similar a la que se le supone (ya que no se lo ha encontrado) al húmero de *Argentinosaurus* (1810 mm) y mayor que la del húmero de *Paralititan* (1690 mm). Sólo los húmeros de algunos braquiosáuridos le superan en longitud; sin embargo, estos dinosaurios desarrollaron unas extremidades delanteras más largas que las traseras; no cabe, pues, compararlos con *Turiasaurus*. Esto explica que los huesos de la pata trasera de *Turiasaurus* sean de mayor tamaño que los de *Brachiosaurus*, aunque no lo sean los de las delanteras. La falange ungueal I del pie de *Turiasaurus* mide 300 mm de longitud mientras que la de *Brachiosaurus* (HMN SII), sólo 240 mm.

Géneros de grandes saurópodos con longitudes que exceden los 30 metros y masas estimadas en 40.000 kg o superiores sólo se conocían entre los neosaurópodos (en diplodócidos y Titanosauriformes). *Turiasaurus*, sin embargo, demuestra que al menos uno

▼ **8. PIE DERECHO de *Turiasaurus riodevensis*.**



Método para el cálculo de masa y longitud de *Turiasaurus riodevensis*

El método de Anderson y colaboradores calcula la masa (M) de un dinosaurio cuadrúpedo basándose en las circunferencias mínimas (C) de la diáfisis del húmero (h) y del fémur (f) de un mismo individuo según la fórmula $M = 0{,}078\ C_{h+f}^{2{,}73}$ para dinosaurios cuadrúpedos.

Según este método, *Brachiosaurus brancai* tendría una masa de 29 toneladas métricas.

Por lo que respecta a *Turiasaurus*, conocemos la longitud del húmero: 1790 mm, pero sólo se dispone del extremo distal del fémur. Para conocer las dimensiones del fémur, necesarias para la estimación de masa, se realizó un análisis comparado con huesos completos de otros saurópodos basales cercanos filogenéticamente a *Turiasaurus*. Los saurópodos utilizados para tal operación fueron: *Gongxianosaurus shibeiensis, Kotasaurus yamanpalliensis, Cetiosauriscus stewarti, Cetiosaurus oxoniensis, Jobaria tiguidensis, Omeisaurus maoianus, Mamenchisaurus youngi* y *Ferganasaurus verzilini*. Las ecuaciones alométricas generadas conducen a una estimación de la longitud del fémur de *Turiasaurus riodevensis* de 2219 mm y, en el caso de la tibia, de 1365 mm.

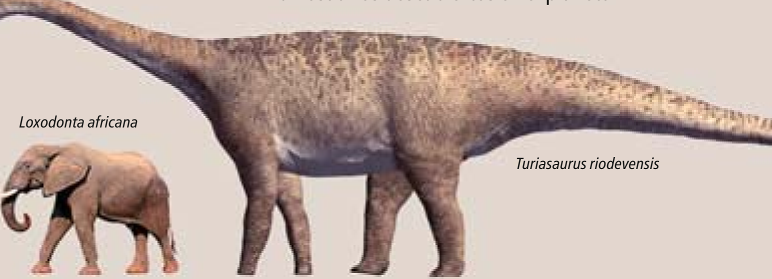
La medida de circunferencia en la mitad de la diáfisis del húmero es de 755 mm. Desafortunadamente, no disponemos de ese dato para el fémur, ya que sólo se ha conservado una parte distal que equivaldría al 16 % del total de su longitud. En esa parte la diáfisis mide 980 mm de circunferencia. Para estimar la medida en la mitad de la diáfisis de este fémur hemos usado referencias de otros fémures de saurópodos conocidos. Como la mínima y la máxima diferencia entre las circunferencias de estos fémures al 16 % de su longitud con respecto a la parte media de la diáfisis (donde se sitúa la menor circunferencia) varía entre un 81 % y 92 %, podemos estimar que la circunferencia aproximada en la mitad de la diáfisis del fémur de *Turiasaurus* variaría entre 794 mm y 902 mm, por lo que, aplicando estos datos a la fórmula de Anderson y colaboradores, obtenemos que nuestro dinosaurio tendría una masa comprendida entre 39,90 y 47,36 toneladas.

Teniendo en cuenta la siguiente ecuación, establecida para estimar longitudes de dinosaurios saurópodos a partir de su masa, establecida por Seebacher en 2004:

$$\text{masa corporal (kg)} = 214{,}44\ (\text{longitud total en m})^{1{,}46}$$

se obtienen unas longitudes para el dinosaurio de Riodeva de 36 y 38 metros, en función de las masas anteriormente calculadas.

Estos datos establecen que *Turiasaurus* es uno de los mayores dinosaurios descubiertos en el planeta.



de los linajes más basales llegó a alcanzar un porte gigante, al margen de los neosaurópodos.

Turiasaurus riodevensis es hasta la fecha el mayor dinosaurio de Europa y uno de los más grandes del mundo, junto a *Argentinosaurus* (Argentina), *Sauroposeidon* (Estados Unidos), *Amphicoelias* (Estados Unidos) y *Paralititan* (Egipto). Un aspecto muy importante es que, entre todos los supergigantes, *Turiasaurus* es el más completo, incluso por delante de *Seismosaurus* (Estados Unidos); este dato tiene aún mayor significación teniendo en cuenta que las excavaciones en el yacimiento Barrihonda-El Humero aún continúan y todavía están proporcionando nuevos fósiles.

No estaba solo

Desde que comenzaron los trabajos de prospección paleontológica en Riodeva se han documentado más de 40 puntos diferentes con restos de dinosaurio. Algunos sólo han proporcionado fragmentos aislados; otros se presentan como yacimientos potenciales. Ya se han acometido varias excavaciones, además de la de Barrihonda-El Humero. Así, en El Carrillejo (RD-11) se ha descubierto una vértebra caudal que muestra afinidades con *Diplodocus* y *Barosaurus* (saurópodos hallados en la Formación Morrison de Estados Unidos) y con *Torniera* (saurópodo de la Formación Tendaguru de Tanzania). El grupo al que pertenecen se denomina Diplodocinae y su presencia en los tres continentes indica que hace unos 150 millones de años pudo haber existido comunicación terrestre entre ellos.

En Riodeva convivieron diferentes especies de saurópodos. Se han desenterrado también restos de estegosaurios (dinosaurios con placas), ornitópodos primitivos (dinosaurios con pies de tres dedos) y terópodos (dinosaurios carnívoros) de diferentes tamaños. Animales de otro tipo también convivían con *Turiasaurus*; entre ellos, cocodrilos, tortugas y peces.

Los trabajos continúan

Las investigaciones en Riodeva han permitido definir un nuevo género y especie, *Turiasaurus riodevensis,* como el mayor dinosaurio de Europa; un nuevo clado, Turiasauria, con representantes en España, Portugal, Francia e Inglaterra; se han descrito restos del primer Diplodocinae de España, así como dos yacimientos de huellas y más de 40 puntos con restos de dinosaurio en el término municipal. Estos logros se han cosechado en cinco años de trabajo, gracias a la instalación en Dinópolis de un equipo estable de paleontólogos.

Bibliografía complementaria

CARACTERIZACION DE LOS DEPOSITOS SEDIMENTARIOS CON DINOSAURIOS DE RIODEVA (TERUEL). L. Luque, A. Cobos, R. Royo Torres, E. Espílez y L. Alcalá en *Geogaceta*, vol. 38, págs. 27-30; 2005.

A GIANT EUROPEAN DINOSAUR AND A NEW SAUROPOD CLADE. R. Royo Torres, A. Cobos y L. Alcalá en *Science*, vol. 314, págs. 1925-1927; 2006.

RIODEVA SITES (TERUEL, SPAIN) SHEDDING LIGHT TO EUROPEAN SAUROPOD PHYLOGENY. R. Royo Torres, A. Cobos, A. Aberasturi, E. Espílez, I. Fierro, A. González, L. Luque, L. Mampel y L. Alcalá en *Geogaceta*, vol. 41, págs. 183-186; 2007.

TERUEL, TERRITORIO PALEONTOLOGICO. L. Alcalá y A. Cobos coord. en *Fundamental*, vol. 11, pág. 119; 2007.

Láseres verdes en miniatura

Los semiconductores generan luz de láser de todos los colores, menos uno. Pero con nuevas técnicas de crecimiento de diodos láser pronto ofrecerán la totalidad del espectro

Shuji Nakamura y Michael Riordan

En enero de 2007, Henry Yang, canciller de la Universidad de California en Santa Bárbara, tras recibir una llamada urgente, abandonó una reunión y corrió hacia el Centro de Iluminación y Visualización de Estado Sólido. Allí investigaba uno de los autores (Nakamura), que acababa de recibir el Premio de Tecnología del Milenio por la creación, en 1993, de los primeros diodos fotoemisores (LED) de luz azul. Nakamura había seguido investigando sobre la iluminación en semiconductores (estado sólido) hasta crear LED verdes y los diodos láser azules que son la base de los modernos reproductores de discos Blu-ray.

Yang tardó escasos minutos en llegar al Centro. En una sala de pruebas encontró a Nakamura y sus colaboradores Steven DenBaars y James C. Speck, que respondían a las preguntas de un grupo de estudiantes e investigadores agolpados en torno a un microscopio. Cuando él mismo se acercó al ocular contempló un relámpago de luz azul brillante que emanaba de un chip cristalino de nitruro de galio (NGa).

Pocos días más tarde, otro grupo de investigadores de la casa Rohm, en Kyoto —asociada al centro de la universidad californiana—, repitió la hazaña con materiales similares. Aunque los diodos láser azules no sean en sí mismos muy revolucionarios [*véase* "Técnica del láser azul para discos compactos" por Robert L. Gunshor y Arto V. Nurmikko; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1996], las Industrias Químicas Nichia (en Tokushima, donde Nakamura trabajó hasta el año 2000), así como Sony y otras empresas todavía luchaban por conseguir láseres de nitruro de galio baratos para el mercado de discos Blu-ray; estos diodos se habían obtenido antes por un método sujeto a pertinaces limitaciones que mantenían elevado su coste de producción.

Los equipos de la Universidad de California y de Rohm están desarrollando un nuevo proceso para el crecimiento de las capas cristalinas de nitruro de galio y aleaciones afines que constituyen un diodo láser. Los primeros éxitos de ese proceso no sólo prometen aumentar el rendimiento, sino que auguran también una recompensa todavía mayor: unos diodos de nitruro de galio resistentes y compactos que emitan luz de láser verde, objetivo que desde hace mucho viene escapándoseles a científicos e ingenieros. Deberían además obtenerse unos LED verdes de alto rendimiento que emitieran mucha más luz que los actuales.

Logros de esta índole llenarían una brecha en el espectro visible precisamente en la zona donde la evolución ha conferido una mayor sensibilidad a nuestros ojos: la "brecha verde" de la tríada rojo-verde-azul, necesaria para la

CONCEPTOS BASICOS

- Los láseres semiconductores pueden emitir luz en las gamas roja y azul del espectro, pero no en la verde.
- Las investigaciones recientes sugieren que esta "brecha verde" podría rellenarse antes de terminar el año.
- Este avance dará origen a pantallas basadas en láseres que por su tamaño puedan integrarse en un teléfono móvil.

proyección y visualización en láser a todo color. Adelantaría la difusión de proyectores láser en salas de televisión y de cine —en colores mucho más vivos que con otros sistemas—, así como de los diminutos "picoproyectores" de mano, que pueden usarse con los teléfonos móviles. Incluso podrían emplearse diodos verdes de alta potencia en la secuenciación de ADN, el control de procesos industriales y las comunicaciones subacuáticas, entre otras aplicaciones.

Desde un ángulo nuevo

El avance que condujo a la iluminación azul brillante por semiconductores fue la adopción, a mediados de los años noventa, de los diodos LED y los láseres de nitruro de galio y sus aleaciones. Con anterioridad, el grueso de los trabajos se había concentrado en el seleniuro de zinc y compuestos afines. En la nueva técnica, una capa extremadamente regular de nitruro de galio e indio (NGaIn), de pocos nanómetros de espesor, se empareda entre dos capas de nitruro de galio (NGa). Se forma así una "heteroestructura" o "pozo cuántico" (*véase el recuadro* "Funcionamiento del láser semiconductor").

Al aplicar un voltaje adecuado, se establece un campo eléctrico perpendicular a esas capas que tiende a juntar los electrones y los huecos —cuasipartículas de carga positiva que corresponden a la ausencia de electrones— en el interior de las capas activas de NGaIn. Dentro de ese estrecho cauce, los electrones y huecos se recombinan y aniquilan mutuamente, generando fotones cuya energía viene determinada por las propiedades del material semiconductor activo. Aumentando la concentración de indio en la aleación, podemos rebajar esa energía, lo que supone aumentar la longitud de onda de la luz, que cambia su color del violeta al azul y al verde.

En los diodos LED, los fotones abandonan el pozo casi de inmediato, rebotando quizás una o dos veces antes de salir del dispositivo o ser absorbidos por las otras capas. Pero en los diodos láser, que emiten luz coherente, los fotones se encuentran, en buena medida, confinados dentro de la capa activa. A uno y otro extremo de la misma hay dos capas espejo muy reflectantes —habitualmente de cristal pulido— que reciclan una y otra vez los fotones hacia el interior y estimulan así nuevas recombinaciones de electrones y huecos. Este proceso de "emisión estimulada" crea la luz del láser: un estrecho haz monocromático de gran pureza de color.

Para fabricar diodos de nitruro de galio ordinarios, se coloca, dentro de una cámara de reacción, una delgada oblea de zafiro (o de

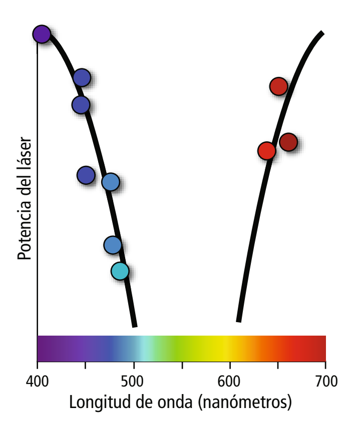

CASPAR BENSON

¿QUE PASA CON LOS PUNTEROS LASER EN VERDE?

Los bien conocidos láseres verdes generan luz mediante un complicado proceso en dos etapas. Contienen en su interior un láser semiconductor que emite radiación infrarroja de unos 1060 nanómetros. Esta radiación bombea un cristal que oscila a la mitad de esa longitud de onda, alrededor de 530 nanómetros, plenamente en el verde. El proceso es caro, ineficaz e impreciso: el segundo cristal recalentado puede alterar la longitud de onda de la luz verde resultante. Los diodos láser que emitan directamente en verde evitarán estos problemas.

EL PROBLEMA DE LA BRECHA VERDE

Hace mucho que se construyen láseres semiconductores que producen luz en las bandas rojas del espectro. A lo largo de los últimos diez años se han conquistado además las gamas azul y violeta. Sin embargo, cuando se intenta llevar estos láseres a la gama verde del espectro, la potencia producida cae muchísimo.



nitruro de galio). Sobre el sustrato escogido, unos gases calientes depositan sucesivas capas de átomos de galio, indio y nitrógeno: las proporciones exactas de cada elemento varían de una capa a otra. Los átomos de esas capas se alinean automáticamente con la estructura cristalina existente, predeterminada en el sustrato. Atomo a átomo, las capas crecen en paralelo con el plano *c* del sustrato, que es perpendicular al eje cristalino de simetría hexagonal (*véase el recuadro* "Un fundamento nuevo").

Por desgracia, las fuerzas electrostáticas y las tensiones internas entre las capas sucesivas de iones de galio o indio con carga positiva y de iones de nitrógeno con carga negativa crean campos eléctricos intensos perpendiculares al plano *c*. Estos campos, que pueden llegar a medir 100 volt por micrómetro —equivalentes a casi 200 millones de volt a lo largo de la altura de una persona—, se oponen al voltaje exterior aplicado. Separan, pues, los electrones de los huecos, lo que entorpece su recombinación y la generación de luz. A un lado del largo "salón de baile" cuántico se amontonan los electrones; al otro, los huecos. Unos y otros se resisten a cruzarlo y reunirse.

Este "efecto Stark cuánticamente confinado" se agudiza sobremanera cuando el color de la emisión pasa del violeta al azul y al verde. Al aumentar la corriente que atraviesa el diodo, el mayor número de portadores de carga bloquea parcialmente los campos eléctricos internos que mantienen separados electrones y huecos. La anulación parcial de tales campos permite que los electrones y huecos se recombinen con energías superiores, lo que desplaza la luz hacia el extremo azul del espectro. Por culpa de tales problemas, los diodos láser verdes y los LED verdes de alto rendimiento tardaron más de diez años en materializarse. (Los punteros verdes de láser de lecciones y exposiciones contienen láseres que emiten radiación infrarroja y excitan otro láser en una complicada e ineficaz operación que dobla la frecuencia.)

Los equipos de la Universidad de California y de Rohm proponen una estrategia para salvar estas dificultades: una delgada oblea de nitruro de galio cristalino puro se talla según un plano lateral más amplio, el plano *m* (*véase el recuadro* "Un fundamento nuevo"), y después se pule. Los diodos fabricados sobre estos sustratos, no polarizados, quedan exentos de los problemas de los ingenios clásicos de plano *c* polarizados; en ellos son mucho más débiles que en éstos los campos perturbadores creados por la polarización y por las tensiones internas.

Los diodos crecidos sobre nitruro de galio alcanzan mayor eficacia lumínica que los de za-

FUNCIONAMIENTO DEL LASER SEMICONDUCTOR

Dentro de un láser de estado sólido, los electrones se encuentran con las entidades de carga positiva llamadas "huecos": se aniquilan mutuamente y generan luz. Para ajustar la longitud de onda de esa emisión, es preciso alterar el material interno del semiconductor. Pero eso puede crear otros problemas.

ESTRUCTURA DE MILHOJAS

Para crear un diodo láser se van depositando capas de material semiconductor sobre un sustrato subyacente. En el extremo inferior de este emparedado semiconductor, el nitruro de galio (NGa) se mezcla ("dopa") con impurezas de silicio para producir un exceso de electrones (cargas negativas). En el otro extremo, el NGa se dopa con magnesio, lo que producirá un exceso de cargas positivas ("huecos"). La aplicación de un voltaje entre los electrodos crea un campo eléctrico que hace encontrarse a electrones y huecos en el interior de las capas activas centrales.

EN EL INTERIOR

Dentro de estas capas, los electrones y huecos se aniquilan entre sí para producir luz (*derecha*). La longitud de onda luminosa depende del contenido en indio (In) de la capa activa: a mayor contenido, ondas más largas y, por tanto, luz emitida más verde. Pero al crecer la proporción de indio en estas capas, es más probable que el indio se acumule en pequeñas "islas" durante la fabricación; esto puede alterar la longitud de onda de la luz, fallo inaceptable en un láser.

SCIENTIFIC AMERICAN (*gráfica*); GEORGE RETSECK (*recuadro*)

UN FUNDAMENTO NUEVO

El sustrato es una lámina de cristal tallada. Toda sustancia que crezca sobre él hereda su estructura cristalina. Los diodos láser en azul que gobiernan los reproductores de discos Blu-ray y las consolas de juegos PlayStation 3 crecen sobre zafiro que, en cuanto sustrato, es bastante barato y se encuentra con facilidad. Pero resulta harto difícil utilizar estos sustratos para fabricar diodos láser en verde; por esa razón se ha recurrido a tallar diferentes facetas.



PLANO *C*: LA TALLA CLASICA

Aunque se utilice habitualmente para los láseres azules, el sustrato de plano *c* tiene sus inconvenientes, como la inducción de campos eléctricos que tienden a separar los electrones de los huecos. El problema se agudiza a medida que la longitud de onda se desplaza hacia el verde.



PLANO *M*: UNA ALTERNATIVA CARA

Dos equipos han acometido el crecimiento de diodos láser sobre un plano *m* del cristal, tallado sobre una faceta lateral del mismo. A los diodos que crecen sobre ese plano no les afectan campos inducidos, pero los sustratos son más caros que en las versiones de plano *c*.



SEMIPOLARIZADO: UN COMPROMISO

Una tercera opción son los sustratos semipolarizados, tallados con una inclinación de 45 grados respecto del eje del cristal. Estos sustratos tampoco producen campos intensos, y al parecer dan láseres y LED de mejor calidad que los obtenidos de sustratos de plano *m*.

GEORGE RETSECK

firo, porque presentan muchos menos defectos cristalinos: irregularidades submicroscópicas y desajustes en las interfaces entre capas sucesivas. Alrededor de esos defectos, los electrones y huecos se recombinan para producir calor en vez de la deseada luz; durante el proceso de crecimiento se propagan fácilmente hacia arriba, a través de las capas del diodo (las llamadas dislocaciones en cadena) hasta alcanzar las capas activas. La presencia de tales defectos hundió los rendimientos de producción la primera vez que Nichia y Sony intentaron fabricar diodos láser azules. Como el sustrato de nitruro de galio ni por asomo presenta los desajustes que el zafiro con la capa inmediatamente superior de NGa o una de sus aleaciones, los diodos crecidos sobre sustratos de nitruro de galio producen mucha más luz y, por consiguiente, tienen que evacuar menos calor.

A partir de 2000, varios grupos —entre ellos los de DenBaars y Speck en la Universidad de California en Santa Bárbara— intentaron aplicar la no polarización, propuesta a finales de los noventa. Los primeros dispositivos ofrecieron prestaciones modestas, por la potísima razón de que no había sustratos de nitruro de galio de alta calidad. En 2006, sin embargo, la Corporación Química de Mitsubishi, en Tokio —asociada también al centro de la universidad californiana—, empezó a suministrar, a los investigadores de Rohm y de Santa Bárbara, sustratos de NGa tallados según el plano *m* de una calidad excelente y con muy pocos defectos. Se tallaban a partir de pequeños cristales de nitruro de galio, del tamaño de una goma de borrar; medían menos de un centímetro de lado.

Con estos nuevos materiales, Rohm y el centro de Santa Bárbara consiguieron diodos LED de rendimiento muy superior. Ya en los comienzos de 2007 intentaron fabricar los diodos láser, un reto de más envergadura. El 27 de enero de 2007, un alumno de doctorado, Matthew Schmidt, entró en el laboratorio para terminar la última etapa de la fabricación del diodo; luego lo trasladó a la vecina sala de pruebas y lo conectó a una fuente de alimentación. Al circular corriente por el diodo, brotó de repente un afilado haz de luz azul-violeta.

Llamó a su tutor Den Baars, quien al principio lo tomó a broma pero enseguida avisó al resto del equipo y al canciller Yang. Al cabo de unos minutos, todos contemplaban el sorprendente resultado. Era el primer diodo láser no polarizado de nitruro de galio que funcionaba en longitud de onda de 405 nanómetros, como lo haría el primer dispositivo de Rohm pocos días más tarde. Y por esos diodos circulaban corrientes sólo de dos a tres veces mayores que las de los dispositivos comercializados por Nichia y Sony, señal de que el calentamiento resultaría manejable.

Los autores

Shuji Nakamura es profesor en el departamento de materiales y director del Centro de Iluminación y Energía de Estado Sólido de la Universidad de California en Santa Bárbara. En 2006 fue galardonado con el Premio de Tecnología del Milenio por su trabajo en diodos láser y LED azules, y con el Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica en 2008. **Michael Riordan** imparte historia de la física y la tecnología en la Universidad de California en Santa Cruz.

La marcha hacia el verde

A raíz de ese descubrimiento, el equipo de Santa Bárbara decidió relegar gran parte de su trabajo sobre diodos polarizados y dedicarse a los no polarizados. Empezó a explorar en una dirección afín: los sustratos de nitruro de galio "semipolarizados", obleas talladas a un ángulo próximo a los 45 grados con respecto a un eje principal del cristal (*véase el recuadro* "Un fundamento nuevo"). En los diodos fabricados con tales sustratos, los campos eléctricos internos son mucho menos intensos que en los diodos polarizados, aunque no tan débiles como en los no polarizados. Se confía en que alguna de esas estructuras permita crear los primeros diodos láser en verde y construir LED de alta potencia en longitudes de onda aún mayores. Por su lado, el grupo de Rohm también avanza con firmeza en esa dirección, concentrando su esfuerzo en los sustratos no polarizados.

Los nuevos sustratos, sin embargo, no pueden por sí solos ir más allá del azul. Para que el diodo emita en verde hay que aumentar el contenido de indio de la capa activa de NGaIn, incremento que exacerba las tensiones internas y altera la estructura cristalina. Aparecen más defectos en el cristal, lo que a su vez reduce la emisión luminosa y genera excesivo calor. Los diodos LED pueden seguir funcionando pese a los nuevos defectos, aunque su rendimiento se desploma a medida que el color pasa de azul a verde. Los diodos láser son aún más delicados y no toleran tantos defectos: la mayor longitud de onda conseguida hasta ahora en un diodo láser es de 488 nanómetros, en la gama azul-verde (cian) del espectro.

Y eso no es todo: las capas de NGaIn han de crecer a temperaturas notablemente más bajas —unos 700 grados frente a los 1000 grados de las capas de NGa contiguas— para evitar que los átomos de indio se disocien del resto de los átomos. Tal disociación puede formar "islas", zonas de aleaciones de indio no homogéneas que hagan variar de un punto a otro la energía de recombinación de electrones y huecos. De ahí resultaría un espectro de emisión demasiado ancho para la luz monocromática coherente que debe dar un láser. Por eso, al elevar la temperatura de la cámara para hacer crecer la siguiente capa de NGa sobre la delicada capa de NGaIn que acaba de depositarse, hay que cuidar especialmente de que no se formen demasiadas islas de ese género. Pero el proceso se hace más difícil a medida que la concentración de indio aumenta.

Los problemas se agudizan en los diodos polarizados: los intensos campos eléctricos en su interior obligan a crear capas activas de NGaIn extremadamente finas, de menos

PROYECTORES DE MANO

Los proyectores de mano más pequeños abultan más o menos como un mando a distancia y generan luz por medio de LED. Se espera comercializar pronto modelos basados en láser. Aunque sigan la técnica de doblar la frecuencia para crear luz láser verde, proporcionan imágenes de alta resolución y rico colorido. Los modelos futuros utilizarán ya diodos láser que emitan directamente en verde, lo que mejorará el brillo y el rendimiento de las pantallas; además, permitirá achicar los proyectores hasta que encajen en un teléfono móvil. Se ilustran aquí dos prototipos en desarrollo basados en láser y algunos de los proyectores con LED ya en el mercado.

MICROVISION SHOW WX ▸
Proyector láser en cuyo interior los haces de luz roja, azul y verde se concentran en un espejo, del tamaño de una cabeza de alfiler. A medida que la luz se refleja, el conjunto especular barre rápidamente adelante y atrás para proyectar los píxeles, uno a uno, en una pantalla o pared. La ausencia de lentes se debe a que el proyector no necesita enfoque.
Resolución: 848 × 480 píxeles (equivalente a un DVD)
Disponible: este año (alrededor de 400 euros)

LIGHT BLUE OPTICS
Este nuevo fabricante está desarrollando un proyector láser, que usa chips de cristal líquido sobre silicio (LCOS); contienen miles de diminutas ventanas de cristal líquido. El chip abre y cierra estas ventanas (píxeles) en rápida secuencia para dejar pasar la luz y formar una imagen. La compañía espera tener un sistema de proyección láser dispuesto para entregarlo a fabricantes de otros productos a principios del año que viene.
Resolución: 854 × 480 píxeles
Disponible: 2010

MPRO110 de 3M ▸
Este fue el primer proyector de mano basado en LED puesto a la venta en EE.UU., en 2008. Aunque un poco más ancho que el Samsung MBP200 (*abajo*), el proyector LCOS crea imágenes de calidad televisiva. 3M autoriza una versión actualizada de la técnica en que se basa el MPro110 para su uso en otras aplicaciones, como los teléfonos móviles.
Resolución: 640 × 480 píxeles (equivalente a la TV de definición estándar)
Precio: alrededor de 300 euros

▾ PICOPROYECTOR SAMSUNG MBP200
Proyector basado en LED que utiliza una versión miniaturizada del chip DLP (procesado digital de la luz) de Texas Instruments. La luz procedente de un LED blanco pasa primero a través de una rueda cuyo color cambia rápidamente, y luego incide sobre una red de miles de espejos. El espesor de cada espejo es aproximadamente la quinta parte de un cabello humano y conmuta miles de veces por segundo. La luz reflejada por estos espejos forma los píxeles que constituyen la imagen.
Resolución: 480 × 320 píxeles (viene a ser la de un teléfono inteligente)
Disponible: este año (alrededor de 500 euros)

PICOPROYECTOR LED DE TOSHIBA ▸
Competidor en LED que utiliza también la técnica del chip DLP.
Resolución: 480 × 320 píxeles
Precio: alrededor de 300 euros



de 4 nanómetros —es decir, de sólo 20 átomos— de grosor. De este modo se favorece la aglomeración de electrones y huecos, lo que multiplica las posibilidades de que se encuentren, acoplen y produzcan luz. Sin embargo, por tener campos eléctricos internos casi despreciables, los diodos no polarizados y semipolarizados admiten capas activas de NGaIn bastante más gruesas, hasta de 20 nanómetros. Aunque también en estas capas se forman islas de indio, se piensa que se encuentran mucho más próximas a las interfaces con el NGa que las rodea. Confinar las islas ahí facilitaría que se obtuviese el espectro luminoso más estrecho que requiere el láser. El mayor grosor y resistencia de las capas activas contribuirá asimismo a simplificar la fabricación: podrán eliminarse las capas extra de "revestimiento" que anteriormente se añadían al diodo para favorecer la captación y guía de los fotones.

Desde la espectacular demostración de enero de 2007, los equipos de Santa Bárbara y Rohm no cesan de ensanchar las fronteras de esta técnica. Casi todos los meses publican nuevos resultados. En abril de 2007, por ejemplo, el grupo de California presentó un diodo LED no polarizado en luz azul-violeta a 402 nanómetros, con un rendimiento cuántico (relación de fotones emitidos a electrones inyectados) superior al 45 por ciento: en sólo un año se había multiplicado por 100 la prestación de estos dispositivos. Meses más tarde, el equipo comunicaba la obtención de LED semipolarizados en verde, que llegaban a funcionar a los 519 nanómetros, con rendimientos próximos al 20 por ciento. (Por desgracia, estos diodos sufrían desviaciones notables hacia el azul, todavía no explicadas.)

Más recientemente, Santa Bárbara fabricaba LED semipolarizados en amarillo, que funcionaban en 563 nanómetros con rendimientos mayores del 13 por ciento: fueron los primeros LED en amarillo eficaces hechos de nitruro de galio y sus aleaciones. Los diodos láser no polarizados se están también aproximando a las prestaciones de sus equivalentes polarizados. En mayo de 2008, Rohm comunicó que había logrado que diodos láser no polarizados funcionasen en longitudes de onda de 481 nanómetros, muy cerca del récord de 488 nanómetros que ostentan los diodos polarizados.

El plato fuerte

No es lo mismo construir un dispositivo en el laboratorio que fabricarlo en cantidades comerciales. Probablemente, el mayor obstáculo para fabricar a gran escala diodos láser y LED de nitruro de galio no polarizados y semipolarizados, en violeta, azul, verde o amarillo, sea conseguir sustratos suficientemente grandes a costes razonables. Mitsubishi suministra sustratos de nitruro de galio, de un centímetro cuadrado aproximadamente, tallados a partir de cristales pequeños; la oblea necesita, sin embargo, una superficie 20 veces mayor.

Según el experto industrial Robert Walker, de Sierra Ventures, en Menlo Park, la producción económica de diodos láser exige sustratos de al menos cinco centímetros de diámetro que cuesten en torno a 2000 dólares por oblea. Y para fabricar los LED, más sencillos y mucho más baratos, habrá que reducir un orden de magnitud más los costes del sustrato. Estos LED todavía tendrán que competir con los LED avanzados en azul y verde, como los que CREE Research en Durham, asociada al centro de la Universidad de California en Santa Bárbara, presentó a finales de 2007, construidos sobre sustratos de carburo de silicio.

Mitsubishi se está encaminando a una fabricación menos farragosa y a mayor escala con miras a comercializar los sustratos de nitruro de galio no polarizados. Kenji Fujito, que desarrolló métodos para el crecimiento de tales sustratos, considera que el proceso es lento y laborioso. En este momento, Mitsubishi está capacitada para producir sustratos de NGa no polarizados (o semipolarizados) en la cantidad justa para cubrir las necesidades de investigación de Rohm y Santa Bárbara. Fujito señala que antes de uno o dos años no se podrán producir obleas de cinco centímetros de diámetro. Walker está de acuerdo, y aventura que pasarán varios años antes de que los sustratos no polarizados resulten económicos, ya sean de Mitsubishi o de otros suministradores, como Kyma Technologies de Raleigh, Carolina del Norte. Pero DenBaars, del grupo de Santa Bárbara, espera que los diodos no polarizados de uso comercial se fabriquen antes, dado el alto rendimiento —y, por tanto, menor coste global— que tales sustratos permitirían.

Mientras tanto, el trabajo de laboratorio seguirá marcando el camino. Los de Rohm y de la universidad californiana, así como algunos otros, están empeñados en conseguir los primeros diodos láser en verde satisfactorios. Y en septiembre de 2008, el grupo californiano comunicó haber observado emisión estimulada en longitudes de onda de 480 nanómetros (cian) y 514 nanómetros (verde) a partir de diodos de nitruro de galio no polarizados y semipolarizados que habían sido ópticamente bombeados con luz de otro láser. No se tardará demasiado en conseguir emisiones similares mediante excitación eléctrica de los diodos. No nos sorprendería que uno de estos equipos, o ambos, lo lograsen este mismo año.

Al circular corriente por el diodo, brotó en él de repente un afilado haz de luz azul-violeta.

Bibliografía complementaria

THE BLUE LASER DIODE: THE COMPLETE STORY. Segunda edición. Shuji Nakamura, Stephen Pearton y Gerhard Fasol. Springer, 2000.

NEW GaN FACES OFFER BRIGHTER EMITTERS. Robert Metzger en *Compound Semiconductor*, vol. 12, n.º 7, págs. 20-22; agosto, 2006.

NON-POLAR GaN REACHES TIPPING POINT. Steven DenBaars, Shuji Nakamura y Jim Speck en *Compound Semiconductor*, vol. 13, n.º 5, págs. 21-23; junio, 2007.

PAGINA OPUESTA: CORTESIA DE MICROVISION, INC. (*Show WX*); CORTESIA DE 3M, INC. (*MPro110*); CORTESIA DE SAMSUNG (*MBP200*); CORTESIA DE TOSHIBA (*Picoproyector LED*)

PREVENCION DE PANDEMIAS

Una red internacional de vigilancia de flujos víricos, de animales a humanos, facilitaría la prevención de epidemias a escala mundial

Nathan Wolfe

CONCEPTOS BASICOS

- La mayoría de las enfermedades infecciosas humanas han tenido un origen animal.
- Históricamente, la epidemiología ha centrado en animales domésticos la fuente de estos azotes. Los animales salvajes nos han transmitido también numerosos patógenos, entre ellos el VIH.
- Para abordar la amenaza que plantean los animales que viven en libertad, se están estudiando los microorganismos asociados y las personas que entran en contacto frecuente con dichos animales.
- Tal supervisión puede facilitar la detección de brotes infecciosos con la antelación suficiente para impedir que se conviertan en pandemias.

Me corría el sudor por la espalda, tenía los brazos lacerados por arbustos espinosos y se nos estaban escapando otra vez. Los chimpancés salvajes que mis colegas y yo habíamos estado siguiendo durante casi cinco horas habían dejado de gruñir, ulular y chillar. En condiciones normales, tales voces nos hubieran ayudado a seguir su rastro a través del bosque Kibale, en Uganda. Que tres machos vigorosos quedasen súbitamente en silencio era presagio de un drama. Los localizamos de pronto, al aproximarnos a un pequeño claro del bosque, erectos al pie de una enorme higuera, con la vista clavada en lo alto, hacia una tropilla de monos colobos que comía y jugaba en la copa.

Los monos proseguían con su comida matinal, ignorantes de los tres simios. Tras lo que pareció ser una breve consulta entre ellos, los chimpancés se separaron. Mientras el líder se deslizaba sigilosamente hasta la higuera, sus compañeros se dirigieron en silencio hacia dos árboles vecinos. Entonces, en un instante, el líder trepó a toda velocidad por la higuera, gritando. Los monos trataron frenéticamente de huir de su atacante, entre una lluvia de hojas. Pero el chimpancé había calculado bien su táctica. Aunque no logró capturar a ninguno de los monos, uno de sus socios sí apresó a un juvenil y bajó del árbol llevando a rastras al monito, dispuesto a compartir su presa.

Mientras los chimpancés se daban un festín con la carne cruda y las entrañas del mono, me vino a la mente que esta escena contenía todos los elementos de la tormenta perfecta para permitir el salto de microorganismos de una especie a la siguiente, algo así como si unos viajeros espaciales, merced a una torsión del espacio-tiempo, pudieran trasladarse de una galaxia a otra. Cualquier agente patógeno presente en la víctima contaba ahora con las condiciones ideales para infiltrarse en un nuevo tipo de huésped: los chimpancés estaban manipulando y consumiendo órganos frescos; tenían las manos cubiertas de sangre, saliva y heces, todas las cuales posibles portadoras de patógenos; los ojos y la nariz, salpicados de sangre y otros fluidos.

Las llagas o cortes que pudieran tener los cuerpos de los cazadores facilitarían a los patógenos una vía directa al torrente sanguíneo. De hecho, trabajos realizados por el nuestro y otros grupos han demostrado que la caza, sea por animales, como los chimpancés, o por humanos, proporciona al virus un puente entre la presa y el depredador. La forma pandémica del VIH (virus de inmunodeficiencia humana) dio comienzo justamente así, pasando de monos a chimpancés y, más tarde, de chimpancés a humanos.

El VIH ha alcanzado tal difusión en nuestros días, que resulta difícil imaginar un mundo libre de él. Pero esta pandemia mundial no era inevitable. Si en los años sesenta y setenta del siglo pasado se hubieran buscado en Africa signos de infecciones de nuevo tipo, los epidemiólogos hubieran tenido noticia del mismo antes de que azotase a tantos millones de personas. Es muy posible que, de contar con esa ventaja, se hubiera podido intervenir y mitigar la difusión del virus.

El VIH no es el único virus que ha llegado hasta nosotros desde una reserva animal. Más de la mitad de las enfermedades infec-

OXFORD SCIENTIFIC *Getty Images*; JEN CHRISTIANSEN (*fotoilustración*)


PELIGRO: Los animales salvajes pueden ser portadores de patógenos con capacidad de saltar a los humanos, el primer paso hacia una infección de gran mortandad. Por ello, el nuevo plan de prevención de pandemias parte de esos animales.

ciosas humanas, actuales y pasadas, se han originado en animales: la gripe, el dengue, el síndrome respiratorio agudo severo (SRAS) y el ébola, por mencionar sólo algunas.

En la actualidad, la enorme interconexión de las poblaciones humanas, tan vinculadas por los viajes terrestres y aéreos, da pie a que las nuevas enfermedades se tornen pandémicas con mayor prontitud, tanto si llegan directamente de animales salvajes (como en el caso del VIH) como si pasan de animales salvajes a domésticos y de éstos a nosotros (como en el caso del virus de la encefalitis japonesa y de ciertas cepas gripales).

Para afrontar tales amenazas, hemos desarrollado un plan osado, que consiste en la supervisión de animales salvajes y de humanos que entran a menudo en contacto con éstos, en busca de indicios de microorganismos nuevos o de alteraciones en la actividad de los mismos. Tenemos la convicción de que tales observaciones

pueden proporcionar la alerta precoz requerida para cercenar de raíz las pandemias.

Virus insidiosos

Nuestro programa de vigilancia resulta de una investigación emprendida hace diez años, cuando iniciamos un estudio de los virus de los habitantes de aldeas y zonas rurales de Camerún, en Africa Central. Los lugareños cazan animales salvajes para comer, para vender su carne o incluso para quedárselos como animales de compañía. Tratábamos de averiguar si se estaban infiltrando, en poblaciones humanas, nuevas cepas del VIH; presumíamos que esas personas corrían un riesgo de infección elevado.

Para entender por qué considerábamos vulnerables a esas poblaciones africanas, repárese en la actividad cotidiana típica de un cazador. Si ha tenido éxito, camina descalzo cargando a la espalda un babuino de unos 25 kilos, cubierto tan sólo por unos pantalones cortos de algodón. Ha recorrido ya varios kilómetros con el animal a cuestas y le faltan todavía algunos más para llegar a su poblado. Mientras camina, la sangre de su presa se mezcla con su propio sudor y se escurre piernas abajo, fluyendo, en su descenso, sobre cortes y arañazos. Los posibles agentes infecciosos de la carne del babuino disponen así de acceso al sistema circulatorio y a los tejidos del cazador.

Si el cazador tuviera la posibilidad de elegir, tanto él como sus paisanos preferirían la carne de cerdo o de vaca a la de mono. Pero tales formas de proteína animal son raras aquí. Así que hace lo que los humanos de todo el planeta han venido haciendo durante milenios: cazar la fauna local. Lo mismo practican mis civilizados amigos en sus cotos cuando cazan venados y celebran sus fiestas camperas. Las únicas diferencias, tal vez, consistan en que el cazador de Africa Central depende de tales alimentos para sobrevivir él y su familia, y que los primates de su "coto" tienen mayor probabilidad que un ciervo —cuyo parentesco con los humanos es mucho más lejano— de transmitirle virus u otros microorganismos.

No resultó sencillo lograr la cooperación de los aldeanos. Muchos temían que fuéramos a incautarnos de su caza. No pudimos comenzar la recogida de datos hasta que nos ganamos su confianza. Su colaboración resultaba esencial: además de extraerles muestras de sangre, para analizarlas, y de incomodarlos con preguntas sobre su salud y sus actividades cazadoras, necesitábamos muestras de sangre de sus presas. Recurrimos a ellos para que nos las facilitaran, impregnadas en papel de filtro que les dábamos.

El autor

Nathan Wolfe es profesor visitante Lorry I. Lokey de biología humana en la Universidad de Stanford y director de la Iniciativa Global de Vigilancia Vírica (GVFI). Se doctoró en inmunología y enfermedades infecciosas en la Universidad de Harvard, en 1998. Wolfe tiene en marcha proyectos de investigación y de sanidad pública en 11 países de Africa y Asia.

Los análisis de sangre de los cazadores y de los cazados revelaron varios virus animales no observados hasta entonces en humanos. Uno de los agentes, del que dimos cuenta en un artículo publicado en 2004 en *Lancet*, se conoce por "virus espumoso del simio" (VES); pertenece a la misma familia que el VIH, los retrovirus.

El VES es endémico en numerosas especies de primates (monos guenon, mandriles y gorilas, entre otros); cada una alberga su propia variedad, genéticamente característica, del virus. Descubrimos que las tres variedades se habían introducido en las poblaciones de cazadores. En uno de los ejemplos más señalados, un hombre de 45 años que informaba de haber cazado y despiezado gorilas (animales raramente perseguidos en la caza de subsistencia) había contraído VES de gorila.

En esas mismas poblaciones centroafricanas hemos descubierto virus humanos T-linfotrópicos (VHTL), una variedad de retrovirus que debe el nombre a su propensión para infectar linfocitos T, un tipo de células inmunitarias. Era ya sabido que había en todo el mundo millones de personas afectadas por VHTL-1 y VHTL-2, virus que, en algunos individuos infectados, contribuían a la aparición de cáncer y de trastornos mentales. Pero los VHTL-3 y VHTL-4, que describimos en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* en 2005, eran desconocidos hasta entonces.

Ante la estrecha semejanza genética del VHTL-3 y su homólogo simiesco, el VSTL-3, da la impresión de que este virus haya sido adquirido en la caza de monos infectados con VSTL-3. No está claro el origen del VHTL-4, pero es posible que, de continuar la explora-

Enfermedades infecciosas procedentes de animales salvajes

Se cree que muchas de las principales enfermedades infecciosas que afectan a los humanos provienen de animales en libertad. De ahí la necesidad de estar atentos a los microorganismos asociados a animales salvajes; no sólo, pues, a los del ganado. En la tabla se enumeran diez azotes y los animales de los que probablemente brotaron.

ENFERMEDAD	FUENTE
Sida	Chimpancés
Hepatitis B	Monos
Gripe A	Aves silvestres
Peste	Roedores
Fiebre dengue	Primates del Viejo Mundo
Enfermedad del sueño en Africa Oriental	Rumiantes salvajes y domésticos
Malaria Vivax	Macacos asiáticos
Enfermedad del sueño en Africa Occidental	Rumiantes salvajes y domésticos
Fiebre amarilla	Primates africanos
Mal de Chagas (tripanosomiasis)	Muchos animales salvajes y mamíferos domésticos

Del microorganismo animal al patógeno humano

El proceso por el cual un patógeno de animales evoluciona hasta convertirse en exclusivamente humano se desarrolla en cinco fases. Los que se encuentran en las fases iniciales pueden resultar muy letales (Ebola, por ejemplo). Mas, en conjunto, no reclaman muchas vidas porque no se difunden libremente entre los humanos. Cuanto mayor sea la capacidad de un virus para propagarse en humanos, tanto más probable es que llegue a convertirse en pandemia.

EJEMPLOS DE ENFERMEDAD Malaria reichenowi — Rabia — Ebola — Dengue — VIH

Fase 1: El patógeno se halla en animales, pero no ha sido detectado todavía en humanos en condiciones naturales.

Fase 2: El patógeno animal se transmite a humanos, pero no hay contagio entre éstos.

Fase 3: Un patógeno animal, transmisible entre humanos, desata un brote morboso de breve duración antes de extinguirse.

Fase 4: El patógeno existe en animales. Cuenta con un ciclo regular de transmisión de animales a humanos y mantiene brotes duraderos en éstos, por contagio entre humanos.

Fase 5: El patógeno se ha vuelto exclusivamente humano.

FUENTE: *"Origins of Major Human Infectious Diseases", por Nathan D. Wolfe, Claire Panosian Dunavan y Jared Diamond, en* Nature, *vol. 447; 17 de mayo, 2007*

ción de estos virus en monos, acabemos descubriendo su antepasado en primates. Ignoramos todavía si el VES o los nuevos VHTL provocan enfermedades en los humanos. Los virus no necesariamente enferman a sus hospedadores, y los que sí lo hacen, e incluso se difunden de unas personas a otras, no siempre provocan pandemias; a menudo se retiran de forma espontánea. Ahora bien, considerando que el VES y los VHTL pertenecen a la misma familia que el VIH, que sí ha engendrado una pandemia a escala planetaria, los epidemiólogos deben vigilarlos atentamente.

Mis colaboradores y yo hemos secuenciado cinco estadios en la transformación de un patógeno de animales en otro especializado en humanos. En la fase 1, el agente mora sólo en animales. En la fase 2, se transmite a humanos sólo desde animales. Un germen ya en estadio 3 se transmite fundamentalmente de animales a humanos, pero logra también cierta difusión entre humanos durante un breve período, antes de extinguirse. Una vez que el agente alcanza el estadio 4, puede sostener rachas más prolongadas entre humanos. Cuando alcanza la fase 5, se ha convertido en un patógeno exclusivo de humanos; ya no utiliza hospedadores animales. Los patógenos en los estadios 4 y 5 tienen la posibilidad de causar fallecimientos humanos masivos.

EN DOS SENTIDOS



Los patógenos no saltan sólo de animales a humanos; viajan también en sentido contrario. Entre las enfermedades infecciosas que los humanos han contagiado, y siguen contagiando, a los animales se cuentan:

- Tuberculosis (al ganado)
- Fiebre amarilla (a monos sudamericanos)
- Sarampión (a gorilas de montaña)
- Poliomielitis (a chimpancés)

Predicción de la próxima pandemia

Si hace 30 años hubiéramos estado pendientes de los cazadores, es posible que se hubiera detectado el VIH a tiempo, antes de que alcanzase el estado de pandemia. Ese momento ha pasado. La cuestión, ahora, es: ¿cómo impedir que surjan nuevas enfermedades de gran mortalidad? En cuanto vimos la posibilidad de estudiar poblaciones remotas, supimos que podríamos extender nuestro campo de trabajo y prestar oído al "parloteo" vírico, vale decir, a los patrones de transferencia de virus animales a humanos. Una supervisión a escala mundial permitiría hacer saltar las alarmas sobre brotes de enfermedades infecciosas antes de que se difundieran sin control.

Felizmente, gracias a una asociación con Google.org y la Fundación Skoll, nos ha sido posible poner en marcha una iniciativa de predicción viriológica global: la Iniciativa Global de Vigilancia Vírica (GVFI, de "Global Viral Forecasting Initiative"). Colaboran en este programa epidemiólogos, fun-

WILFRIED KRECICHWOST *Getty Images (pastor)*; MELISSA THOMAS *(ilustración)*

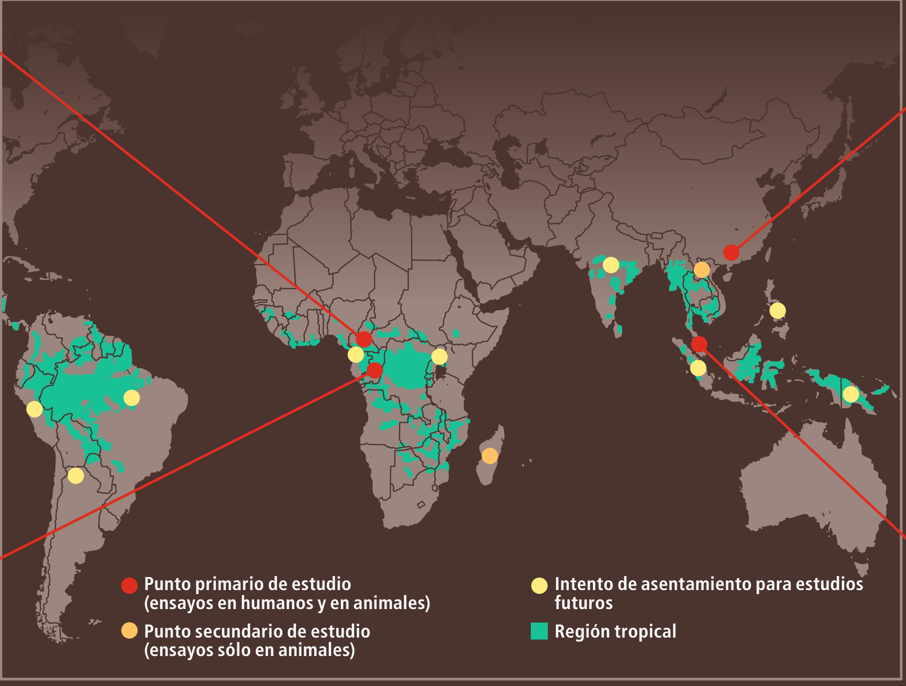
Construcción de una red de vigilancia

Se confía en que el seguimiento de los microorganismos de los animales que viven en libertad y de las personas que están en relación frecuente con ellos facilite la detección de brotes de enfermedades infecciosas antes de su propagación. A tal fin, el autor ha organizado la Iniciativa Global de Vigilancia Vírica (GVFI, de "Global Viral Forecasting Initiative") para la predicción de virus a escala mundial. Cuenta ya con una red de 100 científicos y funcionarios de sanidad pública de seis países (*puntos rojos y naranjas*), que trabajan en el rastreo de agentes potencialmente peligrosos si se trasladan de las poblaciones animales a las humanas. La iniciativa GVFI se centra en regiones tropicales (*verde*), porque son morada de una amplia variedad de especies animales y porque los humanos de esas zonas entran en contacto a través de la caza y otras actividades. La GVFI confía en ampliar la red a más países con niveles elevados de biodiversidad, algunos de los cuales se muestran aquí (*puntos amarillos*).

País: Camerún
Virus originados ya: VIH
Población centinela en estudio: Cazadores y vendedores de carne de caza



País: República Democrática del Congo
Virus originados ya: Marburg, Ebola, viruela de mono
Población centinela: Cazadores y vendedores de carne de caza



cionarios de sanidad y ecólogos de todo el mundo; es su propósito la identificación de agentes infecciosos en sus puntos de origen, la supervisión de tales organismos cuando desbordan su morada en animales y alcanzan a humanos, y el seguimiento de su difusión desde ese punto.

En lugar de centrarse en los virus o las enfermedades concretas del momento, la GVFI se esfuerza en documentar la gama completa de virus, bacterias y parásitos que cruzan la frontera entre animales y humanos.

Aunque la GVFI es una empresa que todavía está echando el plumón, cuenta ya con unos 100 expertos que supervisan animales y grupos humanos que sirven de "centinelas" en Camerún, China, República Democrática del Congo, Laos, Madagascar o Malasia, lugares, todos ellos, de crítica importancia para el brote de enfermedades infecciosas. Muchos de los centinelas son cazadores, pero también se están examinando otros grupos de población con elevado riesgo de contraer enfermedades originadas en la vida silvestre; por ejemplo, de quienes trabajan en los mercados de abastos asiáticos, donde se venden animales vivos para consumo.

El hallazgo en un cazador de un nuevo microorganismo constituye sólo un primer paso del rastreo de una posible nueva patología. Es preciso determinar si este microorganismo es patógeno, si es transmisible entre personas y si ha penetrado en centros urbanos, donde la densidad de población propiciaría su difusión. Su presencia en un centro urbano y distante de la fuente original constituiría un signo preocupante de su potencial pandémico.

En el caso de los VHTL-3 y VHTL-4, estamos comenzando a estudiar poblaciones de riesgo elevado en ciudades próximas a puntos de elevada probabilidad de aparición de enfermedades infecciosas; los controles víricos se llevan a cabo con regularidad. Los enfermos de anemia falciforme, a quienes se

MEDIDAS QUE ADOPTAR

Si se detectan señales de que un patógeno nuevo ha desbordado el ámbito de quienes se hallan en contacto directo con animales, alcanzando a la población general, se lanzará una alarma. Un paso importante para impedir la pandemia consistirá en proteger los bancos de sangre. Ello exigirá un veloz desarrollo e implantación de pruebas diagnósticas del germen.

KARL AMMANN (*cazador en Camerún*); SCHALF VAN ZUYDAM *AP Photo* (*mercado en la RDC*); MELISSA THOMAS (*ilustración*)



País: China
Virus originados ya: SARS, H5N1
Población centinela: Trabajadores de mercados de abastos

País: Malasia
Virus originados ya: Nipah
Población centinela: Cazadores selváticos

KIN CHEUNG *Reuters (mercadillo)*; KAZUYOSHI NOMACHI *Corbis (cazador en Malasia)*; THOMAS BARWICK *Getty Images (perro)*

transfunde periódicamente sangre en el tratamiento, podrían contarse entre los primeros grupos en verse infectados. De hallar, entre tales sujetos, individuos infectados, se habría de proceder a la verificación, a escala mundial, de los suministros de sangre, para proteger a los transfundidos.

Con tal propósito, estamos trabajando con uno de nuestros antiguos colaboradores, Bill Switzer, y con los centros de control y prevención de enfermedades de los Estados Unidos. Nos proponemos desarrollar nuevos métodos de detección de virus en los bancos de sangre.

Otra de las prioridades consistiría en determinar las vías de transmisión del agente infeccioso; ello serviría para modelar tácticas de bloqueo de su difusión. En el caso de un agente de transmisión sexual, los servicios sanitarios podrían poner en marcha campañas de promoción del uso del preservativo, entre otras medidas profilácticas.

También los gobiernos pueden tomar medidas para impedir, en primer lugar, que los virus se infiltren en los bancos de sangre. En vista de nuestros descubrimientos sobre la relación entre la exposición a primates y los nuevos virus, el gobierno canadiense ha modificado su política sobre la donación de sangre y ha excluido a los donantes que hayan tenido contacto con primates no humanos.

La nueva ciencia de prevención de pandemias cuenta, además de nuestros trabajos prospectivos, con programas (HealthMap y ProMED) que compilan informes diarios sobre brotes mórbidos en todo el mundo; cuenta también con sistemas punteros de alerta cibernética, como los encabezados por Google.org, que se valen de regularidades en los datos de los motores de búsqueda para pronosticar brotes de gripe. Por otra parte, los sistemas internacionales de vigilancia, las organizaciones de respuesta de los gobiernos locales y la Organización Mundial de la Salud desempeñarán una función importante en la detención de la próxima peste.

Por nuestra parte, quisiéramos extender nuestra red de supervisión a más países de diversas partes del mundo, entre ellos Brasil e Indonesia, que, por contar con una gran diversidad animal, pudieran transmitir patógenos a los humanos. Un desarrollo más completo de la GVFI será costoso: la construcción de nuestra red y su dotación con recursos humanos y laboratorios adecuados, con capacidad para examinar cada seis meses las poblaciones centinela y los animales con las que éstas entran en contacto, costaría unos 25 millones de euros; su mantenimiento, otros 8 o 10 millones más al año. Pero si con ello se lograse evitar siquiera fuera una sola pandemia en los próximos 50 años, tal inversión habría quedado pagada con holgura. Aunque sirviera sólo para mitigar un acontecimiento tal, su coste quedaría más que justificado.

Los humanos se esfuerzan en prever muy diversas y complejas amenazas naturales. Rara vez se pone en duda la conveniencia de pronosticar huracanes, tsunamis, terremotos o erupciones volcánicas. No existe ninguna razón de peso para creer que la predicción de pandemias sea intrínsecamente más difícil que la predicción de tsunamis. En vista de las enormes sumas de dinero necesarias para detener las pandemias una vez que han arraigado, resulta absolutamente razonable invertir parte de los fondos dedicados a la sanidad pública para evitar que lleguen a producirse. Nunca ha venido más a cuento el principio de que más vale un gramo de prevención que un kilo de curación.

LAS MASCOTAS, TAMBIEN



No son los animales salvajes o los de granja las únicas fuentes de una posible pandemia. También Fido, Feli y otros animales de compañía pueden albergar patógenos de efectos devastadores en humanos. Esta posibilidad emerge cuando la mascota, al entrar en contacto con animales silvestres portadores de gérmenes, contagia a su dueño.

Bibliografía complementaria

NATURALLY ACQUIRED SIMIAN RETROVIRUS INFECTIONS IN CENTRAL AFRICAN HUNTERS. Nathan D. Wolfe et al. en *Lancet*, vol. 363, n.º 9413, págs. 932-937; 20 de marzo, 2004.

EMERGENCE OF UNIQUE PRIMATE T-LYMPHOTROPIC VIRUSES AMONG CENTRAL AFRICAN BUSHMEAT HUNTERS. Nathan D. Wolfe et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 102, n.º 22, págs. 7994-7999; 31 de mayo, 2005.

BUSHMEAT HUNTING, DEFORESTATION, AND PREDICTION OF ZOONOTIC DISEASE EMERGENCE. Nathan D. Wolfe et al. en *Emerging Infectious Diseases*, vol. 11, págs. 1822-1827; diciembre, 2005.

ORIGINS OF MAJOR HUMAN INFECTIOUS DISEASES. Nathan D. Wolfe, Claire Panosian Dunavan y Jared Diamond en *Nature*, vol. 447, págs. 279-283; 17 de mayo, 2007.



1. VITO VOLTERRA (1860-1940).

Vito Volterra

Las transformaciones de la ciencia en el siglo XX y su nueva función en la guerra, la economía y la cultura configuraron el escenario de la actividad del matemático italiano Volterra, entusiasta defensor del valor de las matemáticas para analizar todo tipo de fenómenos físicos, biológicos y económicos

Ana Millán Gasca

A finales de los años veinte del siglo pasado, en Roma, en casa del matemático Guido Castelnuovo (1865-1952) se reunía una vivaz tertulia académico-científica en la que participaba con desenvoltura el físico Enrico Fermi (1901-1954). A pesar de su juventud, Fermi había reunido, en los laboratorios de la céntrica calle Panisperna, a un grupo de discípulos que trabajaban en un proyecto sobre las interacciones en el núcleo atómico. Años más tarde, en vísperas de la Segunda Guerra Mundial, recibiría el premio Nobel por su trabajo sobre física nuclear.

A la casa de Castelnuovo acudían personalidades de la ciencia italiana que gozaban entonces de mayor reconocimiento académico que Fermi: Federico Enriques (1871-1956), experto en geometría algebraica, Tullio Levi-Civita (1873-1941), que contribuyó a sentar las bases matemáticas de la teoría de la relatividad, y el senador Vito Volterra, cuya autoridad matemática e intelectual estaba siendo puesta a dura prueba por su conflicto con el régimen fascista de Benito Mussolini.

En Italia, Enriques era una personalidad pública de relieve. Sus manuales, universitarios y de enseñanza secundaria, y sus libros de divulgación y de historia de las matemáticas contribuyeron al desarrollo de la cultura matemática y al fomento del pensamiento científico. Por ese motivo había entrado en una animada polémica con el filósofo Benedetto Croce, quien mostraba una radical aversión a la ciencia por contraponerse ésta a los valores humanísticos. Pero Volterra tuvo aún mayor influencia: por su labor universitaria, intelectual, institucional y política, puede considerarse el padre de la ciencia italiana moderna.

Los inicios

Dedicarse a la ciencia en los años en los que, conquistada la unidad nacional, Italia emprendía el camino de la modernización industrial y la democracia liberal, podía resultar atractivo para un joven. Pero no era tarea fácil. Volterra nació en Ancona el 3 de mayo de 1860. Huérfano de padre desde su temprana infancia, vivió junto a su madre, Angelica Almagià, con la familia del hermano de ésta, Alfonso, un funcionario de la Banca de Italia, primero en Ancona y más adelante en Turín y Florencia.

Cursó la enseñanza secundaria en el prestigioso Instituto Técnico de Florencia. Fundado como Conservatorio de Artes y Oficios a principios de siglo, el gran duque Leopoldo II lo había trasformado en el Instituto Técnico Toscano, dotándolo generosamente de medios y asignándole la responsabilidad de representar en las exposiciones universales el desarrollo industrial del Granducado.

Volterra tuvo allí entre sus profesores al físico Antonio Roiti (1843-1921), que había convertido el gabinete de física en un laboratorio de física experimental de alto nivel, sobre todo en óptica y electricidad. Roiti, que conocía bien la capacidad e interés científicos del joven Volterra, vino a saber que la familia de éste quería quitarle de la cabeza sus ambiciones científicas, para que se dedicara a la banca, una carrera de futuro. Intervino directamente: lo nombró ayudante en el laboratorio del

CONCEPTOS BASICOS

- Tras lograr la unidad nacional, Italia vivió una brillante etapa cultural y científica. Un protagonista de aquel período fue Vito Volterra, conocido fuera y dentro de su país como "el señor Ciencia italiana".
- Escéptico frente a las nuevas teorías de principios del siglo pasado, desarrolló sus ideas más originales en su esfuerzo por mantener el protagonismo de las ecuaciones diferenciales en la física matemática y en la matemática aplicada.
- De origen judío y demócrata convencido, su oposición al régimen fascista de Mussolini le acarreó duras consecuencias.


Il Secolo
20 marzo 1905

I NUOVI SENATORI

Vito Volterra.

Si possono ancora chiamar nuovi questi senatori per quanto la loro nomina abbia già quindici giorni di data, perchè il Senato non ha ancora avuto modo di convalidarli.

Vito Volterra è tra i più giovani di questa e delle altre *infornate* sebbene il color bianco invada i capelli e la barba dell'illustre matematico. Egli infatti è ancora lontano dai cinquanta, cioè per senatore è giovanissimo. Appartiene alla categoria dei professori ed era tale a poco più di venti anni. A meno di venticinque era già insegnante all'università di Pisa. Passò poi a Torino e quindi a Roma dove insegna tuttora non sappiamo bene se fisica superiore o meccanica celeste. Cose difficili insomma.

E' tra gli scienziati nostri più altamente quotati all'estero, è membro dell'Accademia

2. EN 1905 VOLTERRA fue nombrado senador del Reino de Italia.

Instituto de Estudios Superiores y de Perfeccionamiento de Florencia (futura Universidad de Florencia), donde Volterra inició sus estudios universitarios en el curso 1877-78.

Quedó así a salvo una vocación científica precoz. Con once años, leía ya tratados de matemáticas para universitarios; a los trece, después de leer *De la Tierra a la Luna* de Julio Verne, intentó determinar la trayectoria de un proyectil de cañón en el campo gravitatorio de la Tierra y la Luna, aproximándola mediante una sucesión de pequeños arcos parabólicos.

En 1878 Volterra se trasladó a Pisa. Vivía de la ayuda económica que le prestaban varios familiares. En noviembre del año siguiente superó el examen de ingreso en la elitista Escuela Normal de Pisa. La propia institución le concedió una beca para proseguir sus estudios en calidad de estudiante residente. Era el mejor trampolín a la carrera universitaria. Fueron profesores suyos Ulisse Dini (1845-1918) y Enrico Betti (1823-1892), artífices de la reactivación de la investigación matemática en Italia (había decaído completamente durante un siglo y medio, después de los trabajos de los discípulos de Galileo). Junto a Francesco Brioschi y Felice Casorati, Betti había viajado a Alemania para estudiar temas recientes de análisis matemático y física matemática.

El maestro de Volterra, quien condicionó su visión de las matemáticas y la ciencia, fue Betti. De él heredó una adhesión incondicional a la idea de que la búsqueda de problemas matemáticos debía orientarse según los requerimientos de la física, especialmente en el campo del análisis matemático. En la segunda mitad del siglo XIX, el análisis había extendido sus fronteras: incluía la teoría de las ecuaciones diferenciales ordinarias, las ecuaciones en derivadas parciales y el cálculo de variaciones. Volterra contribuyó a extenderlas aún más allá, guiado por la exigencia de ampliar su campo de aplicación a las cuestiones físicas.

En 1882 completó sus estudios con una tesis dedicada a la hidrodinámica. Trascurridos unos meses en la Escuela Normal como ayudante de Betti, ganó la oposición a la cátedra de mecánica racional de la Universidad de Pisa. En 1892 se trasladó a Turín. En 1900 ocupó la cátedra de física matemática de la Universidad de Roma. Ese año se casó con Virginia Almagià, hija de un primo de su madre que lo había aconsejado y ayudado en sus años de formación, el ingeniero Edoardo Almagià.

Cinco años después, en 1905, como reconocimiento de sus méritos científicos, Volterra fue nombrado senador del Reino de Italia. Fue decano de la facultad de ciencias de la Universidad de Roma desde 1907 hasta 1919. En ese período de gran desarrollo (marcado por los gobiernos del liberal progresista Giovanni Giolitti), se ocupó de diversas cuestiones de política científica nacional, como la reorganización de la Escuela Politécnica de Turín.

La osadía de un conservador

Volterra dedicó la primera fase de su amplia producción científica a la mecánica, la física matemática (teoría de la elasticidad) y a cuestiones de análisis matemático íntimamente ligadas a la física. Ello motivó la introducción de dos conceptos innovadores: las *ecuaciones integrodiferenciales* y las que él llamó “funciones de línea” (es decir, los *funcionales*). En ambos casos, el propósito que animaba a Volterra





GRABADO DE GIUSEPPE VASI (*izquierda*); ARCHIVIO DI STATO DI ROMA; HTTP://WWW.ARCHIVIODISTATOROMA.BENICULTURALI.IT (*derecha*)

3. EL PALACIO LA SAPIENZA, sede histórica de la Universidad de Roma, de la cual se trasladó en 1936.

era el mismo: extender los instrumentos clásicos del análisis para mantener su valor como instrumento intelectual por excelencia en la investigación de los fenómenos físicos.

Las ecuaciones integrodiferenciales correspondían a una generalización de las ecuaciones diferenciales obtenida mediante la introducción de términos integrales. Se trataba, pues, de usar la integral siguiendo el camino indicado por el cálculo de variaciones, que había permitido tratar problemas físicos formulables en términos de optimización.

La idea de Volterra fue introducir los términos integrales para dar cuenta de los fenómenos en los que se manifiesta una *herencia*, como el caso de los sistemas elásticos (en los que el estado del sistema depende de la historia de las tensiones precedentes). Su confianza en el poder unificador del cálculo de variaciones le indujo a no considerar sólo funciones de una o varias variables, sino también "funciones que dependen de otras funciones", como reza el título de su primera memoria sobre el tema, publicada en 1887 en los *Rendiconti* de la Accademia Nazionale dei Lincei.

Aunque resulte paradójico, la motivación que hizo de Volterra un gran innovador fue su empeño en defender el enfoque reduccionista clásico que se inspiraba en el paradigma de la mecánica. La mecánica había sido formulada en su forma matemática más perfecta por Joseph-Louis Lagrange (1736-1813), que había consagrado el lenguaje del análisis y las ecuaciones diferenciales como fulcro de la ciencia del movimiento. Cuando Jean Baptiste Fourier (1768-1830) puso a punto su teoría analítica del calor (para la cual desarrolló el estudio de las ecuaciones en derivadas parciales), había procurado mantenerse dentro de la tradición, interpretándola en un sentido menos estricto. Volterra había seguido el ejemplo de Fourier.

La autora

Ana Millán es profesora del departamento de matemáticas de la Universidad de Roma III. Obtuvo el doctorado en matemáticas por la Universidad de Zaragoza.

Volterra no podía prever que esas innovaciones trazarían el camino hacia una trasformación radical de las matemáticas, relacionada estrechamente con la modificación de la relación entre matemática y física. La noción de funcional era sólo el brote de una nueva rama de las matemáticas, el análisis funcional, dedicado al estudio de la estructura algebraica y topológica de los espacios de funciones. El análisis funcional, desarrollado sobre todo en Francia a principios del siglo xx, se centraba en objetos matemáticos abstractos, más alejados de la realidad concreta de un fenómeno físico que la idea de función introducida dos siglos antes por Leonhard Euler. Volterra fue un pionero de las matemáticas, pero no colaboró en la nueva dirección emprendida por Henri Lebesgue, Frigyes Riesz o Stefan Banach.

Su apego a la tradición de la física matemática llevó consigo un desinterés por la nueva física teórica que estaba tomando forma con el desarrollo de la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad. En su opinión, esas teorías habían abandonando los instrumentos matemáticos clásicos, dejando en segundo plano la medida y la observación, esenciales ambas para la física matemática. Volterra seguía convencido de la validez del enfoque de Fourier en cuanto a la relación entre el modelo matemático y la verificación experimental de las teorías de la física matemática.

En la *fase racional*, partiendo de algunas constataciones empíricas sobre la ley que regula un fenómeno, se formulaba ésta en términos de una ecuación matemática, que luego se integraba (resolvía) o estudiaba mediante las técnicas del análisis. En la *fase aplicada*, se cotejaba el resultado con datos empíricos y, en fin, si era necesario, se modificaban (mediante una metodología retroactiva) las hipótesis de

> **“Mueren los imperios, pero los teoremas de Euclides conservan su eterna juventud.”**
> ***—Vito Volterra***

partida, con lo que se formulaba una nueva ecuación que lograba una mayor adherencia a la realidad. Volterra procuró impulsar esa visión anclada en la tradición mediante su actividad en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas con sede en París.

En los decenios sucesivos, en las matemáticas así como en la física teórica se afirmó una tendencia a defender la propia autonomía. Las matemáticas, en lugar de un conjunto de instrumentos plasmado *ad hoc* por las exigencias de la física, pasaron a considerarse una reserva de formas abstractas. Los matemáticos debían explorar esas formas sin preocuparse por su conexión con la realidad empírica, pero confiados en que “por alguna razón misteriosa”, a su debido tiempo, mostrarían su aplicabilidad al estudio de algún fenómeno de interés. Esta afirmación de autonomía (cuestionada por pocos y propugnada con decisión por el grupo Bourbaki) no ha impedido que las matemáticas aplicadas hayan conocido un gran desarrollo durante el siglo XX, aunque en un cuadro intelectual profundamente modificado.

Curiosamente, Volterra fue uno de los principales impulsores de ese gran desarrollo, gracias a su trabajo pionero en la creación de una biología matemática. Sin embargo, él concibió el proyecto como extensión natural y refuerzo de su visión de la física matemática.



4. LA POPULARIDAD de Volterra hizo que apareciera incluso en viñetas.

Sostenía, pues, un punto de vista radicalmente opuesto al que conquistó la escena científica en la segunda mitad del siglo.

Organizar la ciencia

Ya en su último año en Turín, Volterra empezó a tomar parte en cuestiones organizativas desde su cargo de decano de la facultad de ciencias. En 1897 participó en la fundación de la Sociedad Italiana de Física. Pero el salto cualitativo tuvo lugar con la creación en 1906 de la Sociedad Italiana para el Progreso de las Ciencias (SIPS). Esta asociación científica englobaba estudiosos de todas las disciplinas; estaba guiada por una visión cientificista y patriótica, con vistas a modernizar y reforzar el país en el panorama internacional. La SIPS constituyó un punto de encuentro con los empresarios de la incipiente industria italiana y, sobre todo, con la clase política.

Fruto de esas relaciones fueron otras iniciativas, entre las que destaca el *Comitato talassografico italiano*, una comisión estatal dedicada a impulsar una gestión científica de la actividad pesquera en los puertos italianos. En los años siguientes, la actividad institucional acaparó gran parte del tiempo de Volterra, que se ocupó también de preparar dos monografías, publicadas en París en 1913, que recogían su contribución al análisis: *Lecciones sobre las ecuaciones integrales e integrodiferenciales* (traducida al inglés en 1930) y *Lecciones sobre la teoría de las funciones de líneas*.

En perfecto acuerdo con esa visión cientificista y patriótica, Volterra se alistó, durante la Primera Guerra Mundial, con 55 años, en el cuerpo de ingenieros del Ejército. Se dedicó a analizar el tiro de armas montadas sobre dirigibles y al diseño de aviones. En 1917 se convirtió en el jefe de una sección de la Subsecretaría de Armas y Municiones del Ministerio de la Guerra, dedicada a la investigación bélica. Ese organismo, la Oficina de Invenciones e Investigación (*Ufficio Invenzioni e Ricerche*), fue concebido por Volterra con un objetivo a largo plazo: que la comunidad científica terminara por guiar el desarrollo técnico, sustrayéndolo del control de las autoridades militares.

Volterra coordinaba la actividad de los laboratorios militares. En la sección de invenciones trabajaban físicos, químicos y geólogos. El departamento de estadística y documentación se ocupaba de catalogar resultados y consultar revistas técnicas. Al final de la guerra, el *Ufficio* fue trasformado en una Comisión de Investigaciones (*Comitato di Ricerche*), que fue el embrión del Consejo Nacional de Investigaciones (CNR, *Consiglio Nazionale delle Ricerche*), fundado ya en época fascista (1923). El CNR

"Si se pregunta a un matemático si en su ánimo establece una distinción entre las teorías de la elasticidad y la de la electrodinámica, responderá que no, porque los tipos de ecuación diferencial con los que se encuentra y los métodos que debe emplear para resolver los problemas que se presentan son los mismos en ambos casos.

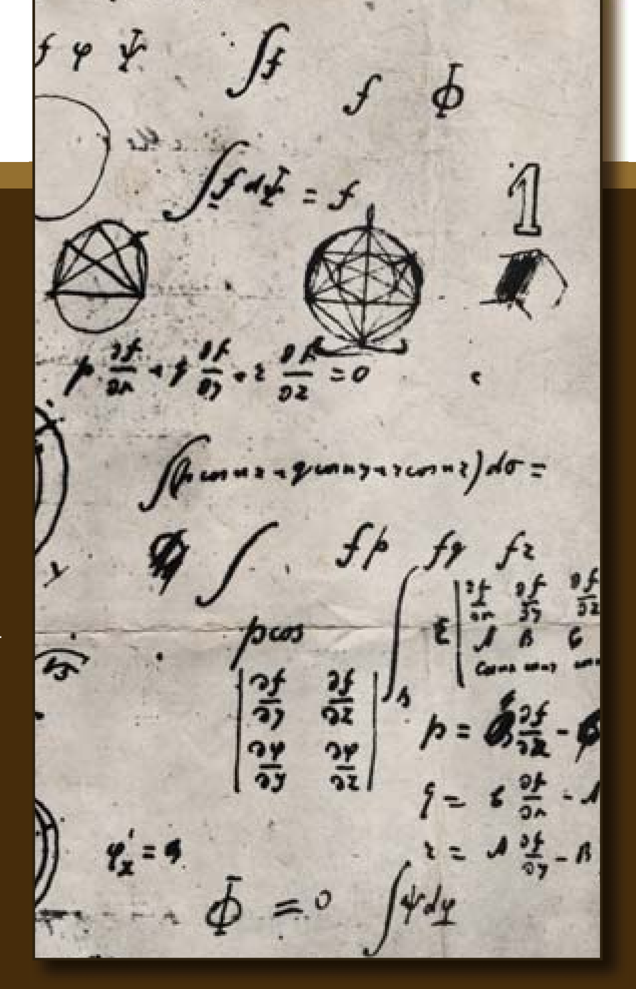
Por otra parte, la coincidencia de las relaciones analíticas ha llevado, de manera simple y natural, a pasar de la teoría elástica a la teoría electromagnética de la luz y esta última, después de varios tanteos, ha adquirido, en el caso de los cuerpos en movimiento, la forma considerada hoy clásica que le ha dado Lorentz.

No dudo en relacionar este movimiento moderno de ideas con el espíritu filosófico que procede de la gran obra de Lagrange.

Lagrange ha reconducido la mecánica a una única fórmula. Del mismo modo, los fundadores de las teorías generales de la física matemática, siguiendo el ejemplo de Fourier, han hecho depender los distintos fenómenos de un cierto número de ecuaciones generales que engloban todos los casos posibles y han reducido la mayor parte de las dificultades analíticas.

Así, como se ha repetido en numerosas ocasiones, la fuente de los mayores logros del análisis han sido los problemas de la naturaleza. Al mismo tiempo, se puede afirmar que todo perfeccionamiento de los métodos del análisis ha contribuido al progreso de la física matemática."

De las *Tres lecciones sobre los progresos recientes de la física matemática* pronunciadas en la Universidad Clark en Worcester (Massachusetts) en septiembre de 1909.



Manuscrito de Volterra

sigue siendo la principal institución extrauniversataria italiana dedicada a la investigación. Fue una de las primeras fundaciones nacionales para la investigación (como el estadounidense *National Research Council*), que, sobre todo a partir de la Segunda Guerra Mundial, se convirtieron en el principal instrumento político para orientar la actividad científica.

Cuando, en octubre de 1922, el rey confió a Mussolini la formación de un nuevo gobierno, Volterra era senador (llevaba en el cargo diecisiete años) y vicepresidente de la Accademia Nazionale dei Lincei, la más antigua academia científica del mundo, a la que había pertenecido Galileo. Al año siguiente fue nombrado presidente de la misma, reflejo del prestigio del que gozaba dentro y fuera del país.

Volterra en España

De entre las personalidades de la ciencia italiana que hemos citado, el nombre que nos resulta hoy más familiar es seguramente el de Fermi. Este era entonces un joven físico atraído por las grandes novedades de la física atómica; se apoyaba en sus contactos con las "altas esferas" para sostener su carrera científica.

En aquellos años, sin embargo, en el reducido círculo científico español, los matemáticos italianos Enriques, Levi-Civita y Volterra no sólo eran conocidos por su prestigio internacional sino que eran considerados casi "de la familia". Varios jóvenes matemáticos españoles estudiaron en Italia bajo la dirección de éstos, mediante becas de la Junta para Ampliación de Estudios. Levi-Civita y Volterra estuvieron en Barcelona y Madrid; incluso publicaron en castellano. Tales contactos personales contribuyeron a la apertura del profesorado español a nuevos temas matemáticos, pues los profesores italianos abrían una ventana a las matemáticas de punta que giraban entonces en torno a París, Roma y las universidades alemanas.

La influencia más significativa sobre el desarrollo de las matemáticas fue la de Enriques. Destacó por su capacidad de mediar entre las investigaciones de geometría "pura" y los enfoques más recientes, que requerían el uso de ideas no estrictamente geométricas (como la idea de grupo). En los años veinte, los libros de Enriques, en italiano, eran manejados en los cursos universitarios de matemáticas, muchos de ellos sobre geometría.

Como es bien sabido, la Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas había dado nueva savia a la comunidad científica española, primero con las becas para ampliar estudios en el extranjero (las "pensiones") y luego con la creación de algunos centros de investigación en Madrid. En 1915 se fundó el Laboratorio y Seminario matemático; lo dirigía Rey Pastor, antiguo becario de la Jun-



5. VOLTERRA en uno de los numerosos actos académicos que protagonizó.

ta y catedrático de análisis matemático de la Universidad Central. En torno al Laboratorio giraban numerosos jóvenes investigadores. En la dirección, además de Rey Pastor, destacaban otros profesores como José María Plans, José Alvarez Ude y José Barinaga. La actividad de este centro se coloca en el origen de la organización de la investigación matemática en España, hasta entonces prácticamente inexistente.

Las visitas de profesores extranjeros dejaron una huella profunda. Volterra visitó Madrid en dos ocasiones. Primero en abril de 1925, para impartir un ciclo de conferencias sobre análisis (traducidas y publicadas en 1927 bajo el título de *Teoría de los funcionales y de las ecuaciones integrales e integrodiferenciales*). Volvió en mayo de 1932 para dar un cursillo en el Laboratorio Seminario, sobre el método de las características en la integración de las ecuaciones diferenciales; impartió también un ciclo de conferencias en la facultad de ciencias sobre biología matemática, el tema que entonces más le interesaba. Esa segunda invitación fue una expresión de solidaridad hacia Volterra, que en su país se encontraba aislado, a causa de su oposición al fascismo.

Los años del fascismo

En el terreno político, Volterra era un liberal. Consideró desde un principio con lucidez el advenimiento del fascismo como un desastre para su país. Mantuvo tal convicción en los años siguientes, y hasta su muerte, con gran determinación, sobrellevando con dignidad las consecuencias de sus actos de resistencia al avance del régimen autoritario en detrimento del estado de derecho. Mostró una oposición moderada (alejada del socialismo y del comunismo), guiada por una adhesión incondicional a los valores democráticos.

En 1923, junto con otros miembros de la Accademia dei Lincei, se opuso a la reforma de la enseñanza que había diseñado el filósofo Giovanni Gentile (1875-1944), ministro de instrucción pública de Mussolini. Volterra firmó el manifiesto promovido por Benedetto Croce en oposición al manifiesto que los intelectuales fascistas de Gentile publicaron el 1 de mayo de 1925 en el periódico *Il mondo*. En las sesiones del senado llevó a cabo una activa oposición parlamentaria. Pero las garras controladoras del régimen fascista se extendían para acabar con la libertad de opinión. Volterra se sintió obligado a dimitir pocos meses antes del final de su presidencia de la Accademia dei Lincei, sin aceptar un nuevo mandato.

Si bien la reforma de Gentile presentaba numerosos aspectos positivos (ha guiado la enseñanza preuniversitaria en Italia hasta tiempos recientes), el control de la enseñanza primaria y secundaria constituyó un elemento central de la "fascistización". El siguiente paso fue extender ese control a la universidad: en 1931 se exigió a todos los profesores un juramento de fidelidad al régimen. Volterra se negó a firmarlo junto a otros once profesores, los únicos de entre 1200 catedráticos de universidad. Fueron expulsados de la universidad y de todas las instituciones científicas y culturales italianas.

Exiliado del ambiente científico nacional, Volterra pasó los años siguientes viajando, sobre todo a París, donde tenía numerosos contactos y un proyecto científico en marcha que absorbía toda su pasión intelectual: la creación de una biología matemática. En 1936, el Papa Pío XI lo nombró miembro de la Academia Pontificia de Ciencias.

Pero las amarguras no habían pasado aún todas: en septiembre de 1938 fueron proclamadas en Italia las leyes raciales que segregaban a los judíos italianos, privándoles de cualquier derecho (desde ir al colegio hasta ser funcionario público o tener en casa una radio).

Para el grupo de matemáticos romanos que se reunía en casa de Castelnuovo, fue un golpe inesperado. Como en tantos otros intelectuales judíos italianos, se habían desdibujado el origen familiar y la fuerza de sus convicciones religiosas, en virtud del patriotismo italiano y la adhesión a los valores de la ciencia.

En ese ambiente, la aversión al fascismo de Volterra hacía que fuera considerado un extremista (sus colegas habían firmado el juramento de fidelidad al fascismo y Enriques era miembro de Partido Nacional Fascista). Todos perdieron su cátedra. Se les impidió incluso acceder a la biblioteca del Instituto de Matemáticas; firmaban los artículos con pseudónimo. Fermi no era judío, pero su mujer sí. Aunque Mussolini lo había nombrado académico de Italia, tras ir a Estocolmo para recoger el premio Nobel, no regresó a su país.

Biomatemática

En los años agitados que siguieron a la instauración del régimen fascista en Italia, Volterra empezó a trabajar en el análisis matemático de un problema biológico. Se trataba de un interés plenamente integrado en su filosofía científica. Había llegado el momento de explorar nuevas vías.

El punto de partida lo sugirió su yerno (el marido de su hija Luisa), Umberto D'Ancona (1896-1964), zoólogo especializado en biología marina. Se trataba de estudiar la evolución de las poblaciones de las especies de peces del norte del mar Adriático, a partir de datos procedentes de las lonjas de pescado de Venecia, Trieste y Fiume. Hoy en día el estudio de la dinámica de las poblaciones desempeña una función fundamental en la ecología animal. En aquella época, el incipiente interés por esos temas dependía de las implicaciones económicas de la pesca (como en el caso propuesto por D'Ancona) y la agricultura (como en los estudios de los entomólogos norteamericanos para la preservación de las cosechas).

D'Ancona se encontraba en medio de una polémica con quienes sostenían que no existía ninguna necesidad de regular la pesca y consideraban ilimitados los recursos marinos. Los datos de D'Ancona correspondían a los años 1905-1923. Englobaban, por tanto, el período de la Gran Guerra, durante el cual se había interrumpido casi por completo la actividad pesquera en Italia. Su estudio podía resultar, pues, de gran utilidad para dilucidar la cuestión anterior.

Yendo al corazón del problema, Volterra se interesó por la asociación biológica presa-depredador. Trató de describir matemáticamente un caso teórico simple. Consideraría sólo dos especies y examinaría los efectos de la interacción recíproca (el depredador devora a la presa) sin tener en cuenta el ambiente, la disponibilidad de alimentos, la reproducción o el envejecimiento de los individuos.

Los resultados indicaban que las dos especies fluctuaban con un ciclo periódico, cuyo período dependía de los coeficientes de crecimiento y de extinción, y del número inicial de

"Los conceptos fundamentales de la filosofía natural son indiscutiblemente los de espacio, tiempo y materia... y basta reflexionar que no se alcanza ninguna ley cuantitativa, ni una concepción exacta del mundo, sin la medida; y no puede hacerse ninguna aplicación de las matemáticas (instrumento poderoso y delicado de la mente humana) si las entidades examinadas no entran en el campo de las conmensurables."

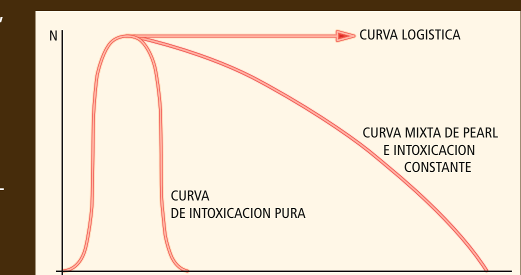
Conferencia sobre "Espacio, tiempo y masa según las ideas modernas", impartida en Buenos Aires, en julio de 1910, en la sede de la Escuela industrial de la nación, y publicada en los Anales de la Sociedad Científica Argentina.

BIOLOGIA MATEMATICA

Volterra aplicó las matemáticas a la biología. Con ello se proponía mostrar que el mismo método que había servido para el estudio de problemas de mecánica, termodinámica y elasticidad, era aplicable a cualquier otro campo de fenómenos.

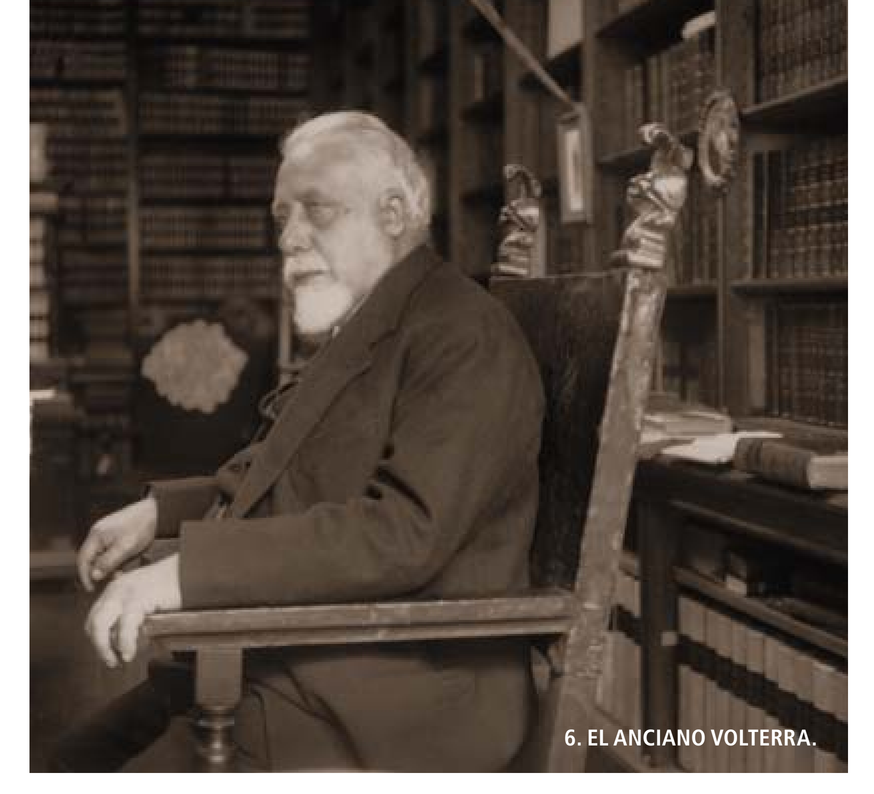
Estudió la evolución de las poblaciones de peces del norte del mar Adriático. Se centró en un modelo simplificado de la interacción presa-depredador de dos especies (no tuvo en cuenta el ambiente, la disponibilidad de alimentos, la reproducción ni el envejecimiento de los individuos).

Se trataba, pues, de un sistema dinámico en el que entraban en juego dos funciones (N_1 y N_2) del tiempo (t), que indicaban el número de individuos de cada una de las especies. A partir de dos ecuaciones diferenciales que relacionaban las funciones con su velocidad de crecimiento (derivada), planteó un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales. Halló que las dos especies fluctuaban según un ciclo periódico, cuyo periodo dependía de los coeficientes de crecimiento y de extinción, y del número inicial de individuos de cada especie.



Volterra analizó también otros problemas biológicos: la relación simbiótica y la asociación de tres especies. Introdujo nuevos factores biológicos (envejecimiento de los individuos) para aumentar la adherencia a la realidad biológica. Con el propósito de exponer ordenadamente sus ideas a un público no matemático, relacionó sus análisis matemáticos con un caso básico estudiado ya en el pasado: la evolución cuantitativa de una sola especie. La gráfica, que pertenece a uno de los estudios de Volterra, muestra varias funciones del crecimiento poblacional.

GRAFICAS ELABORADAS A PARTIR DE: *LE ASSOCIAZIONI BIOLOGICHE*, POR V. VOLTERRA Y U. D'ANCONA, DIRIGIDO POR G. ISRAEL, EDIZIONI TEKNOS; ROMA, 1995.



6. EL ANCIANO VOLTERRA.

individuos de cada especie. Descubrió también otro fenómeno espectacular: si se destruían, a un ritmo uniforme y proporcional a su número, individuos de las dos especies, se obtenía un incremento de la media de los individuos de la especie presa y una disminución de la media de la especie voraz; y, al contrario, reforzar la protección de la especie devorada hacía aumentar las dos medias. Ello concordaba con las observaciones de D'Ancona: la pesca había favorecido a las especies que se alimentaban de vegetales o invertebrados en detrimento de las especies que se alimentaban de peces; la interrupción de la pesca había recuperado el equilibrio natural en beneficio de los peces depredadores.

En los años siguientes, Volterra examinó otros casos (relación simbiótica y asociación de tres especies) e intentó introducir nuevos factores biológicos para aumentar la adherencia a la realidad biológica (el envejecimiento de los individuos, por ejemplo). Mantuvo una animada correspondencia internacional con biólogos, con el propósito de difundir sus ideas y encontrar nuevos datos experimentales con los que verificar sus resultados matemáticos. Se interesó por exponer con claridad sus ideas al público no matemático. Para ello relacionó sus estudios con un caso conocido: la evolución cuantitativa de una sola especie (curva exponencial del crecimiento maltusiano y curva logística de Verhulst-Pearl). Su idea fija era mostrar que el mismo método que había servido para el estudio de problemas de mecánica, termodinámica y elasticidad, era aplicable a cualquier otro campo de fenómenos.

Sin embargo, su visión de la ciencia perdía adeptos. Un comentario de D'Ancona nos ayuda a comprender la evolución futura de una matemática aplicada basada sobre la idea de "modelo matemático": "considero que su trabajo tiene importancia por sí mismo como elaboración teórica del problema de la convivencia, independientemente de la eventual verificación experimental de sus leyes". Hoy en día, se justifica a menudo la falta de conexión con la realidad de los modelos matemáticos basándose en la "modestia" de las ambiciones que tienen tales modelos: no pretenden sacar a la luz las leyes generales que regulan un conjunto de fenómenos, sino simplemente explorar aspectos parciales de la realidad.

Ultimos años

Aquejado por una flebitis, Volterra pasó los dos últimos años de su vida en su casa de Ariccia, en las afueras de Roma. Pero no abandonó su campaña de difusión de la biomatemática. Se concentró en el área de lengua inglesa, que se había mostrado menos receptiva. En 1939, publicó dos artículos en la revista americana *Human Biology* y en la revista de la Sociedad Matemática de Edimburgo. En ese mismo año se estrenó en París, en el recién creado Palais de la Découverte, el documental científico *Imágenes matemáticas de la lucha por la vida* (uno de los primeros de la historia del cine).

En colaboración con Vladimir Kostitzin (1882-1963), geofísico ruso exiliado en París, Volterra seguía de cerca los experimentos microbiólogicos del laboratorio de Jean Régnier (1892-1946), profesor de la facultad de farmacia de la Universidad de París. Esos experimentos se habían diseñado para obtener las pruebas empíricas que los datos de observación no proporcionaban, pues las fluctuaciones de las poblaciones podían deberse a factores ambientales y no a interacciones ecológicas. En medio de achaques y preocupaciones, Régnier intentaba animar a Volterra elogiando la genialidad y humanidad de su obra.

La extraordinaria trayectoria de Volterra no puede circunscribirse a la ciencia de su país, que amó con intenso patriotismo, pues es emblemática de los avatares de la ciencia en la fase que se cierra con la Segunda Guerra Mundial. Dicha etapa se considera una "segunda revolución científica", por las grandes rupturas teóricas que se registraron en la física y en las matemáticas, así como por el radical paso adelante de la ciencia en la escena social, económica y política. Volterra apoyó con firmeza la contribución de la ciencia a la modernización y al progreso. Pero defendió siempre la exigencia de mantener firme el timón de la actividad científica, que, sin renunciar a sus aplicaciones, debía proceder guiada por una metodología rigurosa y por una visión profunda de la ciencia como búsqueda del saber.

Bibliografía complementaria

LA ORGANIZACION DE LA INVESTIGACION MATEMATICA EN ESPAÑA EN EL PRIMER TERCIO DEL SIGLO XX: EL LABORATORIO Y SEMINARIO MATEMATICO DE LA JUNTA PARA AMPLIACION DE ESTUDIOS (1915-1938). E. Ausejo y A. Millán en *Llull, Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas*, vol. 12, n.º 23, págs. 261-308; 1989.

LA CORRESPONDENCIA VITO VOLTERRA-VLADIMIR KOSTITZIN (1933-1962) Y LOS INICIOS DE LA BIOMATEMATICA. G. Israel y A. Millán en *Llull, Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas*, vol. 16, n.º 30, págs. 159-224; 1993.

EL IDEAL DE LA MATEMATIZACION. LA INTRODUCCION DE LA MATEMATICA EN LAS CIENCIAS BIOLOGICAS, HUMANAS Y SOCIALES. A. Millán en *Arbor, ciencia, pensamiento y cultura*, vol. 606, págs. 79-102; 1996.

THE BIOLOGY OF NUMBERS. THE CORRESPONDENCE OF VITO VOLTERRA ON MATHEMATICAL BIOLOGY. G. Israel y A. Millán. Birkhäuser Verlag; Basilea, 2002.

La trampa del estrés postraumático

Existe un convencimiento creciente de que el concepto de trastorno de estrés postraumático se ha sacado de quicio. Los soldados sufren las consecuencias

David Dobbs

En 2006, poco después de regresar de su misión militar en Ramadi, Irak, durante el período más sangriento de la guerra, el capitán Matt Stevens, de la Guardia Nacional de Vermont, empezó a tener problemas con el TEPT, o trastorno de estrés postraumático, y no precisamente por padecerlo. Su problema fue que empezó a tener muchas dudas acerca del trastorno: la afección era real, pero observó que se diagnosticaba con demasiada frecuencia, de forma alegre e incluso peligrosa.

Stevens se hallaba al mando de los servicios sanitarios de una brigada acorazada de 800 soldados. Su equipo atendía a soldados norteamericanos y ciudadanos iraquíes. Vio cosas terribles. Dice que tras regresar a casa había pasado muchas "noches en las que me despertaba y estaba claro que no me iba a volver a dormir".

No le sorprendió: "*Esperaba* que al regresar se tuviera pesadillas durante un tiempo". Pero al sondear a su unidad en EE.UU., vio que las tropas a su regreso eran recibidas por unas formas de ver, tanto estrictamente médicas —sobre todo en la Administración de Veteranos (AV)— como más generales, que parecen categorizar de forma inconsciente los malos recuerdos, las pesadillas y cualquier otro síntoma de angustia como un indicador de TEPT.

"Los especialistas clínicos no distinguen a los pocos que de verdad tienen TEPT de los que experimentan depresión, ansiedad, problemas sociales o de integración, ni de aquellos a quienes les cuesta algún tiempo superarlo", dice Stevens. Le preocupa que a muchos de esos hombres y mujeres se les esté arrastrando a un tratamiento y a un régimen de discapacidad que los envolverá en una idea que se alimenta a sí misma, la de que tienen un cerebro alterado, una psique permanentemente angustiada.

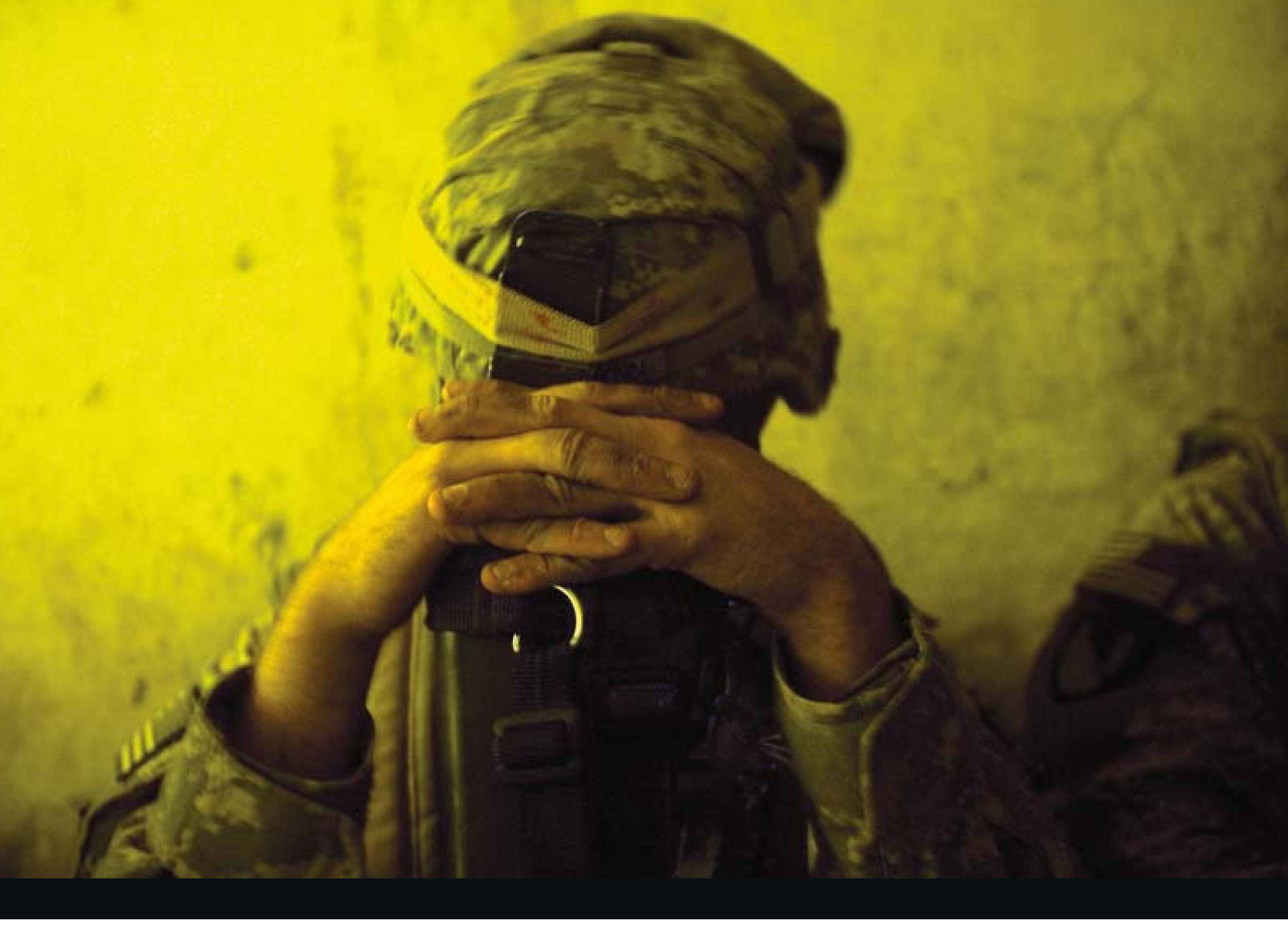
Stevens, con el empleo ya de comandante, se encuentra en reserva activa. No es ni mucho menos el único preocupado por el alcance del TEPT. En los últimos cinco años, aproximadamente, el debate larvado sobre los fundamentos conceptuales y la incidencia del TEPT ha empezado a aflorar. Actualmente está dividiendo la práctica de la psicología del trauma y agita las formas de pensar al respecto en el ejército.

Las críticas que en un principio suscitaron historiadores militares y psicólogos, las apoya ahora una amplia diversidad de expertos y grandes figuras de la psicología, la psiquiatría y la epidemiología. Entre ellos, Robert L. Spitzer y Michael B. Firts, de la Universidad de Columbia, que supervisaron para la Asociación Norteamericana de Psiquiatría las dos últimas ediciones del *Manual diagnóstico y estadístico de los trastornos mentales,* el *DSM-III* y el *DSM-IV*; Paul McHugh, antiguo director del departamento de psiquiatría de la Universidad Johns Hopkins; la epidemióloga Naomi Breslau, de la Universidad estatal de Michigan; y el psicólogo Richard J. McNally de la Universidad de Harvard, la más destacada autoridad en las dinámicas de la memoria y el trauma, y quizás el más crítico. Todos aseguran que el criterio diagnóstico del TEPT representa un constructo inexacto y anticuado, del que se ha abusado hasta confundirlo con la depresión, la ansiedad o, incluso, el proceso normal de adaptación.

El intento por delimitar la definición de un trastorno tan específico y muy pertinaz, podría exigir el desembolso de miles de millones de dólares y afectar al marco de diagnóstico de la psiquiatría, a la efectividad de una enorme infraestructura de tratamiento y discapacidad y, lo más importante, a la salud mental y el futuro de cientos de miles de ex-combatientes norteamericanos y otros pacientes con TEPT. A la reforma se oponen la opinión ortodoxa, una profunda resistencia cultural y los conceptos fundacionales de la psicología del trauma. Con todo, y según declaraba Spitzer recientemente, es hora de "salvar al TEPT de sí mismo".

CONCEPTOS BASICOS

- El síndrome del trastorno de estrés postraumático (TEPT) es el blanco de críticas porque sus criterios de definición son demasiado amplios y se está diagnosticando de forma desenfrenada.
- La mala definición del TEPT puede confundir el proceso natural de adaptación de los soldados a la vida civil con una disfunción.
- Los soldados mal diagnosticados reciben tratamiento equivocado y corren el riesgo de verse envueltos en el sistema de la Administración de Veteranos, que fomenta la discapacidad crónica.



TYLER HICKS *New York Times*

LA ANGUSTIA PUEDE SER UNA RESPUESTA NORMAL al dolor y a la pérdida de un ser querido, o signo de una lesión psíquica que no está cicatrizando. Los críticos del protocolo de diagnóstico del trastorno de estrés postraumático, entre ellos muchos soldados, consideran que a menudo el proceso natural de adaptación de los veteranos se etiqueta erróneamente como disfunción.

Sondeos

Los críticos dicen que las cifras demuestran que el TEPT se diagnostica con demasiada alegría. Así se declara en el ponderado Estudio Nacional de la Rehabilitación de los Veteranos de Vietnam (ENRVV) sobre la prevalencia del TEPT. Este estudio analizó en 1988 a más de mil varones veteranos de Vietnam y refirió que el 15,4 por ciento tenía TEPT en ese momento y que el 31 por ciento lo habían padecido en algún momento desde la guerra. Desde entonces, ese 31 por ciento ha sido la estimación estándar de la incidencia de TEPT entre los veteranos.

En 2006, sin embargo, el epidemiólogo Bruce P. Dohrenwend, de la Universidad de Columbia, con la esperanza de responder a los persistentes interrogantes sobre este estudio, decidió revisar las cifras. Después de cribar los diagnósticos que estaban pobremente documentados, descubrió que en realidad el 9 por ciento padecía TEPT en 1988, y el 18 por ciento alguna vez en la vida.

McNally comparte la admiración general por el cuidadoso trabajo de Dohrenwend. Poco después de ser publicado, afirmó que las cifras de Dohrenwend seguían siendo demasiado altas porque contaba como casos de TEPT a los veteranos que presentaban sólo síntomas suaves, que no llegaban al umbral del trastorno, personas a los que se consideraba que estaban "yendo bien en general". Si se incluía sólo a aquellos que sufrían una "afección clínicamente significativa" —el nivel requerido para que se diagnostique la mayoría de las enfermedades mentales y se reciba la compensación del seguro—, la tasa bajaba más aún, al 5,4 por ciento en el momento del estudio y al 11 por ciento para quienes lo habían padecido alguna vez. No fue uno de cada tres veteranos los que después de la guerra desarrollaron TEPT, sino uno de cada 9; y sólo 1 de cada 18 lo padecía en un momento concreto. Dicho de otro modo, parece que el ENRVV exageró los porcentajes de afectados por el TEPT entre los veteranos de Vietnam en casi el 300 por ciento.

"El TEPT es algo real, sin duda", dice McNally. "Pero como diagnóstico se ha vuelto tan endeble, abarca tanto y está tan enraizado en la forma más común de ver las cosas, que es casi seguro que lo estamos confundiendo con otras afecciones y, por tanto, tratándolo erróneamente".

La idea de que el TEPT se diagnostica más veces de las justas parece contradecir los informes que hablan de la reticencia del ejército y la AV a reconocer el trastorno. Dicen esos informes que ambos organismos se niegan a diagnosticar el trastorno y a la concesión de las prestaciones correspondientes; que los médicos especialistas militares dan de alta a soldados en vez de tratarlos; que sube de modo preocupante el número de suicidios entre los veteranos de las guerras de Oriente Medio. Aun así, las dos tendencias son compatibles. El número de casos de TEPT de la AV se ha duplicado con creces desde 2000, sobre todo por los veteranos de Vietnam diagnosticados nuevamente. La respuesta pobre y desigual a los soldados actuales y a los veteranos recientes, que pone a algunos rápidamente bajo tratamiento para el TEPT y a otros los disuade o se lo deniega, puede ser una reacción de pánico en un sistema sobrecargado.

Según los críticos, revisar el diagnóstico y el sistema médico de la AV asegurará una mejor atención para quienes de verdad padecen TEPT y para quienes están sufriendo un diagnóstico erróneo. Pero los futuros reformadores se enfrentan a una feroz oposición. Como apunta McNally, "este argumento tiende a fastidiar de verdad a algunos". El mismo ha recibido amenazas de veteranos por correo electrónico, y los colegas le acusan de deshonrar a los veteranos, de desdeñar su sufrimiento, de no tener en cuenta los costes de la guerra. Dean G. Kilpatrick, traumatólogo de la Universidad de Carolina del Sur y antiguo presidente de la Sociedad Internacional de Estudios de Estrés Traumático (ISTSS), en una ocasión llamó con todas las letras mentiroso a McNally.

Un diagnóstico problemático

El DSM-IV, la edición más reciente (se publicó en 1994) del DSM, define el TEPT por la presencia de tres grupos de síntomas que surgen como respuesta a un acontecimiento en el que peligró la vida: volver a experimentar los hechos en pesadillas o reviviscencias; conducta de evitación, en forma de embotamiento o de retraimiento; e hiperactivación, que se manifiesta por medio de irritabilidad, insomnio, agresividad o falta de concentración (*véase el recuadro* "TEPT: Un problema definido por su causa").

Esta definición es cuestionable. Por lo pronto, que el TEPT esté relacionado con un acontecimiento traumático lo hace especial entre los diagnósticos psiquiátricos complejos: lo define por una causa externa. Y también lo hace especialmente problemático porque, en realidad, el vínculo es con los recuerdos de ese acontecimiento. Cuando en 1980 se incluyó el TEPT por primera vez en el DSM, en la versión III, los recuerdos traumáticos se consideraban registros razonablemente fieles de los acontecimientos reales. Pero como han venido demostrando reiteradamente las investigaciones desde entonces, la memoria no es nada fiable y sí muy maleable. Incorporamos o borramos de nuestros recuerdos a personas, detalles, situaciones o acciones de manera rutinaria. Combinamos, inventamos y corregimos.

En un estudio de la investigadora de la memoria Elizabeth F. Loftus, de la Universidad de Washington, uno de cada cuatro adultos al que se le dijo que se había perdido en un supermercado de niño llegó a creérselo. Algunos insistieron en que el acontecimiento había ocurrido incluso después de que se expusiera la estratagema. Posteriormente, numerosas investigaciones han confirmado que estos falsos recuerdos son comunes.

Los soldados no son inmunes a esa tendencia. En un estudio realizado en los años noventa en la Universidad de New Haven, Connecticut, el hospital de la AV preguntó a 59 veteranos de la guerra del Golfo, al mes de su regreso, sobre sus experiencias y, de nuevo, dos años después. Los investigadores les preguntaron sobre 19 tipos específicos de acontecimientos traumáticos potenciales, tales como presenciar muertes, perder amigos o ver personas desfiguradas. A los dos años, el 70 por ciento de los veteranos refirieron al menos un acontecimiento traumático que no habían

TEPT: Un problema definido por su causa

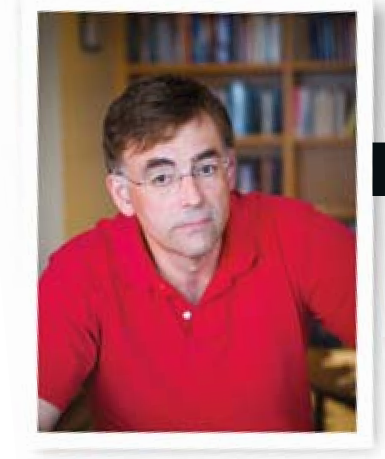
En el actual *Manual diagnóstico y estadístico de los trastornos mentales* (*DSM-IV*) de la Asociación Norteamericana de Psiquiatría, el primer criterio diagnóstico del trastorno de estrés postraumático (TEPT) es haber experimentado un trauma:

"La persona ha estado expuesta a un acontecimiento traumático con las siguientes características: (1) la persona experimentó, fue testigo o se enfrentó a un acontecimiento o acontecimientos que implicaron muerte o amenaza de muerte, lesión grave o amenaza a la integridad física propia o de otros; (2) las personas reaccionaron con miedo intenso, indefensión u horror".

La presencia de tres conjuntos de síntomas —volver al acontecimiento, por ejemplo, en pesadillas o reviviscencias; embotamiento o retraimiento; e hiperactivación, evidente en la irritabilidad, el insomnio, la agresividad o falta de concentración— durante más de un mes y hasta el punto de causar "angustia clínica significativa o impedimento para desenvolverse en el ámbito social, en el ocupacional o en cualquier otro de importancia" completa la definición del síndrome.

Los críticos de este constructo diagnóstico argumentan que los mismos síntomas son propios también de un amplio espectro de trastornos diferentes y aparecer juntos en personas que no han experimentado traumas.

El TEPT fue definido ya en el *DSM-III*, publicado en 1980, como respuesta a los psiquiatras y veteranos que se oponían a la guerra de Vietnam y buscaban un diagnóstico para reconocer lo que consideraban sufrimiento característico de los veteranos de Vietnam.

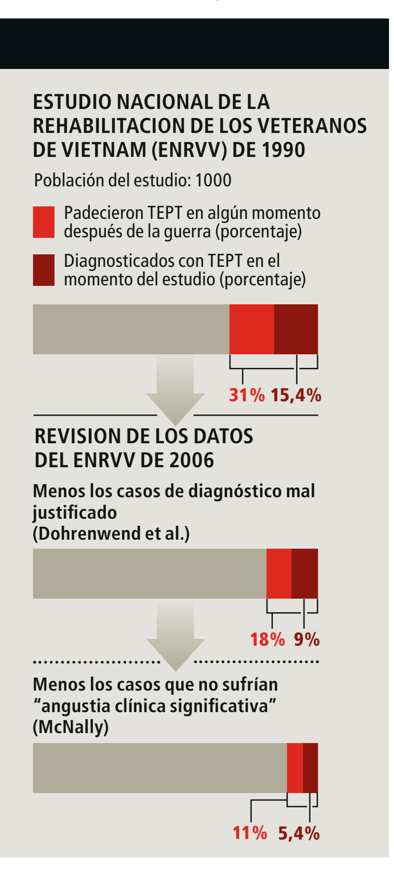


Richard J. McNally, Universidad de Harvard

"El TEPT es algo real, sin duda", dice McNally. "Pero como diagnóstico se ha vuelto tan endeble, abarca tanto y está tan enraizado en la forma más común de ver las cosas, que es casi seguro que lo estamos confundiendo con otras afecciones y, por tanto, tratándolo erróneamente."

DISCREPANCIAS EN EL DIAGNOSTICO

Las estimaciones de la incidencia de TEPT entre soldados se inflan a menudo por varias razones; entre ellas, la vaguedad de los criterios que informan el diagnóstico de la afección. La valoración de las preguntas —y respuestas— en las encuestas se hallan sometidas a un amplio margen de interpretación subjetiva. Un análisis más estricto de los datos del Estudio Nacional de la Rehabilitación de los Veteranos de Vietnam, por ejemplo, reducía la incidencia de TEPT a un tercio de la cifra original.



mencionado un mes después de regresar; el 24 por ciento refirieron al menos tres acontecimientos de este tipo por primera vez. Y los veteranos que refirieron el mayor número de "nuevos recuerdos", declararon también el mayor número de síntomas de TEPT.

Para McNally, estos resultados sugieren que algunos veteranos que experimentan TEPT de "aparición tardía" pueden estar atribuyendo los síntomas de depresión, ansiedad u otros trastornos sutiles a recuerdos reelaborados, a los que se ha dado nuevo significado o que se han inventado inconscientemente.

"Esto no tiene nada que ver con intentar burlar el sistema ni con buscar compasión", dice McNally. "Todos lo hacemos: formulamos nuestra vida mediante narraciones que nos ayudan a comprenderla. Un veterano con una vida difícil puede recordar un trauma, lo haya traumatizado de verdad o no, y todo cobra sentido."

Para conseguir un diagnóstico más riguroso del TEPT, algunos han sugerido que el desorden podría detectarse con análisis de sangre, pruebas de imagen cerebral u otros tests. Algunos estudios de hormonas del estrés en grupos de pacientes con TEPT muestran diferencias con respecto a sujetos normales; ahora bien, como el solapamiento entre el grupo normal y el de TEPT es enorme, resultan inútiles los perfiles individuales para el diagnóstico. La imagen cerebral tiene las mismas limitaciones: las dinámicas anormales del TEPT se solapan considerablemente con las de la depresión y la ansiedad.

Con una memoria poco fiable y unos marcadores biológicos imprecisos, el diagnóstico depende de los síntomas clínicos. Pero ya en 2007 quedó demostrado que el perfil de los síntomas de TEPT era tan escurridizo como los posibles biomarcadores. J. Alexander Bodkin, del Hospital McLean de Harvard, sometió por separado a una revisión a 90 pacientes con depresión clínica. Buscaba síntomas de TEPT y traumas; luego, comparó los resultados. Primero, él y un colaborador evaluaron los síntomas con una entrevista estándar. Después, otros dos especialistas en el diagnóstico de TEPT, desconocedores de los síntomas así evaluados, utilizaron otra entrevista estándar para ver qué pacientes habían experimentado alguna vez traumas que encajaran con el criterio del DSM-IV.

Si el TEPT lo provocara el trauma, los pacientes con síntomas de TEPT deberían tener un historial traumático; los afectados con trauma deberían mostrar más TEPT. No fue así. Aunque las revisiones de los síntomas dieron positivo para TEPT en 70 de los 90 pacientes, la evaluación de traumas encontró sólo 54 que hubiesen sufrido uno: los "casos" diagnosticados de TEPT superaron a los que habían experimentado acontecimientos traumáticos.

Fue aún peor cuando Bodkin comparó los diagnósticos uno por uno. Si el TEPT requería trauma, entonces los 54 pacientes expuestos a trauma deberían explicar la mayoría de los 70 pacientes que dieron positivo en TEPT. Pero los pacientes con síntomas de TEPT se distribuyeron por igual entre los grupos que dieron positivo y negativo en trauma. La relación entre la tasa de TEPT y la de trauma fue nula. Era, en palabras de Bodkin, una situación científicamente inaceptable. Desde un punto de vista más práctico, como apunta McNally: "Para dar el mejor tratamiento, el diagnóstico tiene que ser correcto".

El tratamiento más efectivo para los pacientes cuyos síntomas los provoca el trauma es la terapia cognitivo-conductual basada en la exposición al trauma (TCC), que altera la respuesta a un recuerdo traumático específico exponiendo al paciente a ese recuerdo de forma repetida y controlada. "Y funciona", dice McNally. "Si alguien que verdaderamente tiene TEPT recurre a quienes lo saben hacer realmente bien, tiene muchas oportunidades de mejorar." La TCC aplicada a la depresión, por el contrario, enseña al paciente a reconocer bucles emocionales y de pensamiento disfuncionales, y a desarrollar nuevas respuestas a acontecimientos normales, de la vida diaria. "Si una persona deprimida interpreta que sus problemas se deben al TEPT y recibe una TCC basada en la exposición al trauma, perderemos


JUSTIN IDE *Harvard News Office* (*McNally*); JEN CHRISTIANSEN; FUENTES: "FINDINGS FROM THE NATIONAL VIETNAM VETERANS READJUSTMENT STUDY," POR J. L. PRICE, CENTRO NACIONAL PARA EL TRASTORNO DE ESTRES POSTRAUMATICO; "THE PSYCHOLOGICAL RISKS OF VIETNAM FOR U.S. VETERANS: A REVISIT WITH NEW DATA AND METHODS", POR B. DOHRENWEND ET AL., EN *SCIENCE*, VOL. 313, 18 DE AGOSTO DE 2006; "PSYCHIATRIC CASUALTIES OF WAR", POR R. J. McNALLY, EN *SCIENCE*, *IBID*. (*gráficos*)

el tren", declara McNally. "Nos dedicaremos a perseguir este recuerdo, en vez de lidiar con el modo en que el paciente malinterpreta los acontecimientos presentes."

Para complicarlo más, estudios recientes muestran que los daños cerebrales traumáticos por explosiones de bombas, comunes entre los soldados desplegados en Irak, producen síntomas casi indistinguibles de los del TEPT. Otro conjunto más de síntomas que se solapa. "La cuestión del solapamiento me preocupa", afirma Gerald M. Rosen, de la Universidad de Washington, de extensa experiencia con pacientes de TEPT. "Debemos preguntar cómo hemos llegado hasta aquí. Tenemos que preguntarnos: ¿qué ganamos con este diagnóstico?"

Condiciones de la discapacidad

Rosen piensa en los especialistas clínicos cuando se hace esa pregunta. Pero, ¿qué gana un veterano de guerra con que se le diagnostique un TEPT? Cabría esperar que le garantizase respaldo y un tratamiento efectivo. No es así. En las poblaciones civiles, dos tercios de los pacientes con TEPT responden al tratamiento. Pero como apunta Christopher Frueh, que investigó y trató el TEPT para la AV desde principios de 1990 hasta 2006: "Ninguno de los dos estudios más importantes de la AV sobre veteranos de combate mostró que el tratamiento tuviera efecto. Los veteranos tratados de TEPT por la AV no tienen más posibilidades de mejorar que si se les dejase a su aire".

La razón, dice Frueh, es que los caprichos del constructo del TEPT chocan con el sistema de discapacidad de la AV, en el que todas las prestaciones parecen pensadas para desalentar la recuperación.

La primera prestación es la asistencia sanitaria. El TEPT es, con diferencia, el diagnóstico de salud mental al que más fácil resulta incluir en la categoría de "relacionado con el ejército", una denominación que a menudo implica la diferencia entre una asistencia escasa o nula y una cobertura médica amplia y duradera. La relación con el ejército convierte también a un veterano en candidato a recibir una paga mensual por invalidez de hasta 3000 dólares. Esa relación puede explicar por qué la mayoría de los veteranos que consiguen tratamiento por TEPT de la AV afirman que sus síntomas empeoran hasta que se les asigna un 100 por ciento de discapacidad; en ese momento, el uso que hace de los servicios de salud mental de la AV cae un 82 por ciento.

La relación con el ejército podría explicar por qué, a pesar de que el riesgo de TEPT debido a un acontecimiento traumático disminuye con el tiempo, el número de veteranos de Vietnam que solicita discapacidad por TEPT se duplicó entre 1999 y 2004: las pagas por discapacidad por TEPT superaron los 4000 millones de dólares anuales.

Quizá lo más desastroso es que estas pagas continúan sólo si se está enfermo. A diferencia de un veterano que ha perdido una pierna, un veterano con TEPT pierde las prestaciones por discapacidad tan pronto como se recupera o empieza a trabajar. El sistema entero parece diseñado para fomentar la invalidez crónica. "En los muchos años que he pasado en las clínicas de TEPT de la AV", afirma Frueh, "no recuerdo un solo paciente de TEPT que dejara el tratamiento por haber mejorado. Pero el problema no son los veteranos. El problema es que el sistema de discapacidad de la AV, que tiene ahora 60 años, ignora toda la investigación realizada sobre la resistencia mental, sobre el poder de las expectativas y sobre los efectos de los incentivos y la falta de incentivos. Algunas veces pienso que deberían anularlo todo y empezar de nuevo". Pero, ¿con qué?

Richard A. Bryant sugiere un sistema de discapacidad más parecido al de Australia. Un soldado australiano herido en combate recibe una paga "no económica" por discapacidad de por vida, de entre 200 y 1000 euros mensuales. Si la lesión no le permite trabajar, recibe una pensión de invalidez, así como formación para trabajar y ayuda para encontrar empleo. Finalmente —una característica crucial— mantiene todas esas prestaciones durante dos años, una vez vuelve a trabajar. A partir de ahí, la pensión va reduciéndose durante cinco años, hasta anularse. Pero las prestaciones "no económicas" —una especie de condecoración en dinero— siguen para siempre. Y como todos los australianos, el soldado consigue asistencia médica gratuita de por vida. Los veteranos australianos regresan a casa con un sistema de apoyo completamente diferente del estadounidense: el suyo es un andamio que pueden escalar; el estadounidense, una "red de seguridad" que cuelga a baja altura, capaz de atrapar a cualquiera que caiga en ella.

Dos maneras de llevar un rifle

Cuando un soldado regresa a casa debe intentar reconciliar su experiencia en la guerra con la persona que era antes y con la sociedad y la familia a las que se reincorpora. Debe implicarse en lo que Rachel Yehuda, que investiga sobre el TEPT en el hospital de AV del Bronx, denomina "recontextualización": el proceso de integrar el trauma en la experiencia normal. Es lo que todos hacemos, en distinto grado, cuando sufrimos una ruptura, perdemos el trabajo o fallece un ser querido. Al principio, el

CONDECORACION DENEGADA

El Departamento de Defensa de Estados Unidos anunció en enero que no concedería la condecoración "Corazón Púrpura" a los veteranos de guerra diagnosticados con TEPT. La resolución se basaba en parte en una distinción entre heridos que pueden ser valorados objetivamente y el sufrimiento psíquico, más subjetivo. Una dividida reacción pública ante la decisión destacó el fuerte significado emocional y cultural ligado a este diagnóstico, así como los problemas del constructo diagnóstico.

Por un lado, la neurociencia reciente deja claro que los trastornos graves de salud mental reflejan disfunción cerebral, si no lesión orgánica; parece justo considerar las heridas psíquicas de guerra tan reales como las físicas. Al mismo tiempo, la falta de un diagnóstico claro que delimite el TEPT y otros trastornos depresivos y de ansiedad, junto con los indicios significativos de que se diagnostica el TEPT demasiadas veces, hará que la concesión de esta medalla por sufrir la afección sea una propuesta muy problemática hasta que se aclare la naturaleza del TEPT y la ciencia identifique algunos biomarcadores indiscutibles.



ALEX WONG *Getty Images*


Ataque contra un vehículo militar en Ramadi, Irak

REUTERS

Estudios recientes muestran que los daños cerebrales traumáticos por explosiones de bombas, comunes entre los soldados desplegados en Irak, producen síntomas casi indistinguibles de los del TEPT.

Otro conjunto más de síntomas que se solapa.

acontecimiento nos parece una aberración intolerable. Después, vamos aceptando lentamente el trauma como parte de la complejidad de la vida.

El comandante Matt Stevens reconoce que este ajuste puede llevar tiempo: él sigue soñando con la guerra, incluso dos años después de haber regresado. Sueña en ocasiones que se encuentra en una actividad de la vida ordinaria, pero lleva su rifle de combate: "Una noche soñé que estaba observando las aves con mi mujer. Cuando veíamos un pájaro ella levantaba los binoculares y yo mi rifle, y miraba el pájaro a través de la mirilla. Sin intención de disparar, sólo para observarlo".

Sería fácil ver en el sueño de Stevens un síntoma de TEPT, ya que expresa miedo, hipervigilancia y evitación. Pero puede también interpretarse como un éxito de la recontextualización de su experiencia: reconcilia al hombre que una vez usó un arma con el hombre que ya no lo hace.

Salvar al TETP de sí mismo, afirman Spitzer, McNally, Frueh y otros críticos, requerirá un cambio similar: entender mucha de la angustia que sucede al combate como parte de una curación normal, aunque dolorosa y no como un trastorno. Este cambio implicaría, para empezar, la revisión de los criterios diagnósticos del TEPT —actualmente bajo examen para el nuevo DSM-V, que se publicará previsiblemente en 2012—, de modo que considerasen la poca fiabilidad de la memoria y distinguieran mejor la depresión, la ansiedad y la fobia, por una parte, y el verdadero TEPT, por la otra.

Las evaluaciones de la salud mental necesitan una revisión similar para que puedan detectar los casos verdaderos y no lleven a los pacientes a reconcebir como traumas otros problemas de salud mental. Por último, el Congreso debería reemplazar el sistema de discapacidad de la AV con otro que se fundamente en las pruebas y acabe con la falta de incentivos para recuperarse; e incluso ir más allá y darles a todos los combatientes veteranos, lesionados o no, asistencia médica de por vida.

Estos cambios serán difíciles de defender cuando la mentalidad imperante se resiste a cualquier insinuación de que el TEPT es una consecuencia común, incluso inevitable, del combate. La mayoría supone que este trastorno es una epidemia, y confunde el horror que provoca con su preponderancia, ignorando todo indicio de lo contrario.

El mayor estudio longitudinal de soldados que han regresado de Irak, dirigido por el investigador de la AV Charles Milliken y publicado en 2007, parecía confirmar que deberíamos esperar una mayor incidencia de TEPT. Analizó a los combatientes en dos momentos, recién llegados del combate y seis meses después. Descubrió que el 20 por ciento, a juzgar por los síntomas, "corría riesgo" de padecer TEPT. De cuantos declararon tener síntomas en el primer sondeo, la mitad había mejorado para el segundo, y muchos que al principio habían dicho que padecían pocos síntomas o ninguno, más tarde afirmaron tenerlos graves. ¿Cuántos de los primeros "síntomas" se debían a un proceso normal de adaptación? ¿Cuántos de los síntomas posteriores se debieron a haber reconcebido otros problemas como traumas?

Stevens se muestra convencido de las revisiones en cuestión no distinguen a muchos que están pasando por un proceso de adaptación normal de quienes sufren grave riesgo de TEPT. El mismo, aunque está reaccionando bien en el trabajo, en casa y en la sociedad, dio positivo en *ambos* sondeos; en otras palabras, pertenece al 20 por ciento considerado de "riesgo". Por último y curiosamente, ambas revisiones pasaron por alto al 75 por ciento de quienes solicitaron asistencia, lo que suscita más dudas sobre su precisión. Pese a todo, el estudio recibió amplia cobertura en los medios de comunicación, que subrayaron que las tasas de TEPT se estaban subestimando.

Unos meses después, otro estudio —el primero en abarcar la evolución de una cifra alta de soldados de las guerras de Irak y Afganistán— presentó un cuadro más claro y coherente. Lo dirigió Tyler Smith, de la Armada norteamericana, y se publicó en el

El autor

David Dobbs colabora en *Mente y cerebro* y fue fundador del blog *Mind Matters*, en SciAmMind.com.

British Medical Journal. El estudio tomó nota de la salud mental y la exposición al combate de 50.000 soldados entre 2001 y 2006. El trabajo puso especial interés en relacionar los síntomas con tipos de exposición al combate. De 12.000 militares abordados, que fueron a Irak o a Afganistán, el 4,3 por ciento desarrolló síntomas de TEPT de un nivel suficiente para diagnosticarles el trastorno. La tasa iba de alrededor del 8 por ciento en los que habían estado expuestos al combate al 2 por ciento en aquellos que no.

Los números equivalen a la cuarta parte de los obtenidos por Milliken. Pero se acercan más a las tasas de TEPT encontradas en los veteranos británicos de la guerra de Irak y a las que calculó McNally para los veteranos de Vietnam. El contraste con el estudio de Milliken, junto con la semejanza con las tasas británicas y con los cálculos del ENRVV, debería haber convertido al estudio de Smith en una noticia de portada. Sin embargo, los medios de comunicación, la AV y los psicólogos expertos en traumas lo ignoraron. Como apuntó McNally con ironía, "el silencio fue ensordecedor".

Quizás el silencio fuera un caso más de noticia importante que pasa inadvertida. Aun así, apoya la opinión de McNally de que tenemos una obsesión cultural con el trauma. La atención selectiva respalda el criterio de Ben Shephard, para quien la propia sociedad norteamericana se benefició con la creación del diagnóstico de TEPT a finales de los años setenta: fue una manera de ver los costes de la guerra que, al convertir a los guerreros en víctimas, nos permitía proclamar que reconocíamos el horror de la guerra y nos absolvía por haberlos enviado al campo de batalla. Habíamos sido víctimas, engañadas para apoyar una guerra de la que luego nos arrepentimos. Debemos reconocer el horror de la guerra. Debemos lamentar el dolor de los soldados. Pero imbuirle a un soldado angustiado la idea de que no podrá escapar a sus recuerdos, de que le falta la fortaleza para incorporar su pasado a su futuro, es realzar nuestra sensibilidad moral a costa del soldado.

El TEPT existe. Doquiera se presente habrá que tratarlo. Pero nuestra obsesión cultural por el TEPT ha magnificado y quizá finalmente se ha convertido en el problema mismo; un fracaso prolongado por contextualizar y aceptar nuestra propia agresividad colectiva. Puede ser nuestra propia neurosis de posguerra.

Bibliografía complementaria

A WAR OF NERVES: SOLDIERS AND PSYCHIATRISTS IN THE TWENTIETH CENTURY. Ben Shephard. Harvard University Press; 2001.

PROGRESS AND CONTROVERSY IN THE STUDY OF POSTTRAUMATIC STRESS DISORDER. Richard J. McNally en *Annual Review of Psychology*, vol. 54, págs. 229-252; 2003.

SAVING PTSD FROM ITSELF IN DSM-V. Robert L. Spitzer, Michael B. First y Jerome C. Wakefield en *Journal of Anxiety Disorders*, vol. 21, n.º 2, págs. 233-241; febrero, 2007.

POSTTRAUMATIC STRESS DISORDER: AN EMPIRICAL EVALUATION OF CORE ASSUMPTIONS. Gerald M. Rosen y Scott O. Lilienfeld en *Clinical Psychology Review*, vol. 28, n.º 5, págs. 837-868; junio, 2008.

El mundo cóncavo

¿Es posible rebatir teorías descabelladas?
¿O realmente vivimos en la superficie interior de una esfera hueca?

Norbert Treitz

Muchos creadores y seguidores de teorías e ideas que no arraigan se consideran "científicos incomprendidos". Se comparan, entre otros, con Cristóbal Colón o con Robert Mayer (1814-1878), uno de los introductores de la primera ley de la termodinámica. Confían en que al final se les hará justicia, lo mismo que sucedió con sus personajes incomprendidos. Verdad es que Colón y Mayer atinaron pese a sus errores y conclusiones ilícitas. Por el contrario, también hay teorías desfasadas, la mecánica de Aristóteles o la química del flogisto, a las que simplemente se tiene por erróneas y por eso se subestiman los logros de sus creadores.

La situación de las "teorías del mundo cóncavo" es diferente. Son absurdas, sin más. Pero al menos una de ellas no se deja rebatir. Y resulta instructiva cuando se reflexiona sobre la didáctica y la teoría de la cognición.

Si no podemos rebatirla, ¿con qué derecho la tiramos a la papelera? ¿Quizá porque va en contra del "sentido común"? No sería un buen argumento, porque la física nos impone más cosas ininteligibles que todas las pseudociencias juntas.

Pero, ¿hay que dar carta de ciudadanía a todas las opiniones que no tengan un contraejemplo evidente? Cuando se reflexiona sobre la ciencia, esa cuestión ronda a veces, adornada con la palabra "relatividad" o asociada a la idea "constructivista" de que cada conciencia crea su propia realidad y todas esas realidades son en principio equiparables. Pero así habría que abandonar el afán de la ciencia. Cada uno debe tener la posibilidad de decir y escribir por su cuenta lo que crea sin por ello ser detenido o, peor aún, torturado. Sin embargo, los ministerios de investigación y las escuelas públicas tienen que discriminar entre ciencia y esoterismo.

A diferencia del creacionismo y del diseño inteligente, la excéntrica teoría de que se trata aquí es inofensiva. Resulta incluso un error interesante. Un buen profesor no se limitará a tacharla, ya que verá en ella un motivo de reflexión. Se propone que vivimos en la parte interna de una esfera hueca de unos 40.000 kilómetros de circunferencia en cuyo seno suceden todos los fenómenos astronómicos. En 1870, Cyrus Reed Teed (1839-1908) enunció la idea. Tuvo un defensor en los años treinta, Johannes Lang. Hoy le han salido múltiples partidarios en Internet.

La galaxia en una "cáscara de nuez"

La atmósfera, las trayectorias de la Luna y los planetas, las estrellas y galaxias estarían situados en el interior de nuestra esfera hueca, y nosotros seríamos como hormigas que se han extraviado en el interior de una bola de Navidad. Las galerías de las minas estarían excavadas radialmente hacia fuera. ¿No debería ser posible, pues, ver hasta Australia sin ayuda de espejos, al menos cuando hace buen tiempo, o recibir programas de radio directamente desde allí?

Esta pregunta supone que las ondas luminosas y las ondas de radio se propagan en línea recta. Pero eso ya no es del todo cierto dentro de la atmósfera, debido a la refracción; al atravesar lentes, la discrepancia se nota mucho más, y cerca de estrellas de neutrones o incluso de agujeros negros no se puede hablar en absoluto de rectitud. Pues bien: los seguidores cabales del mundo cóncavo nos explicarían que ni siquiera en el vacío la luz sigue una línea recta, sino un círculo que pasa por el punto central del mundo cóncavo. Cerca de este punto todas las velocidades disminuyen tanto, que ni la luz ni la materia lo pueden atravesar en un tiempo finito.

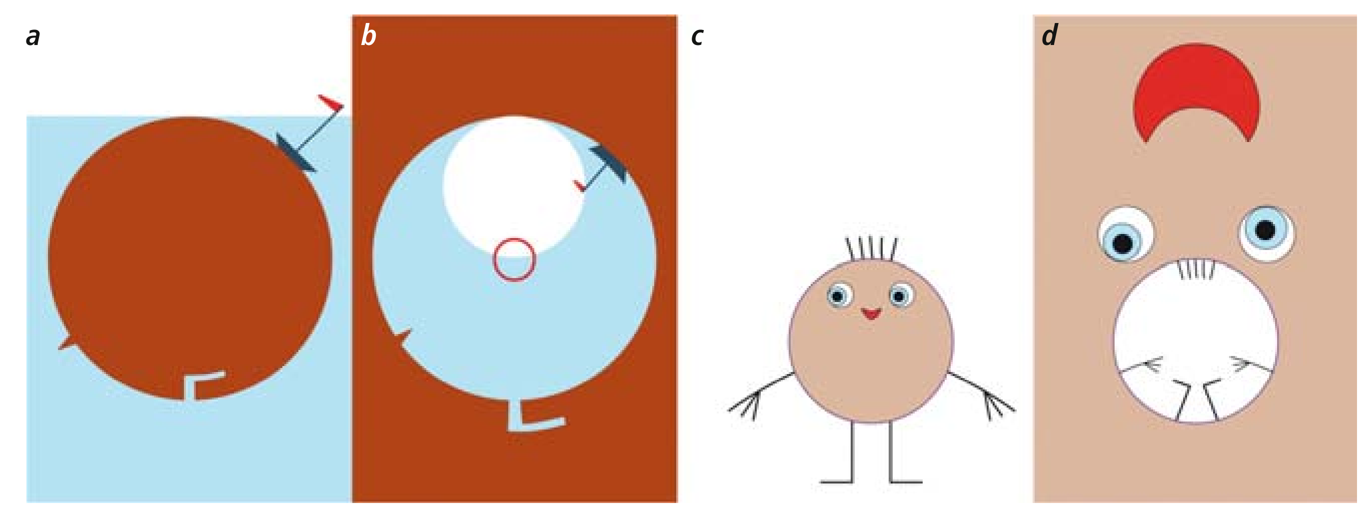
Suposiciones semejantes no se salen de lo común en la física moderna; sólo el papel especial que representa el punto central del mundo cóncavo resulta un tanto extraño. Volveremos sobre esto.





1. **Una mirada desde fuera del modelo (*izquierda*) no revela que se trate de una esfera hueca. Este modelo de una Tierra hueca realizado en cartón piedra fue preparado por Martin Straube para el área de física del Instituto de Enseñanza Media de Wittenberg.**

MARTIN STRAUBE



2. En la Tierra (con una montaña alta, una mina y un barco), un observador que se encuentre en el vértice superior podrá sólo ver el banderín rojo del barco; el resto queda bajo el horizonte (*azul*), indiferentemente de que lo mire desde el punto de vista euclídeo (*a*) o invertido (*b*). El círculo rojo (en *b*) es la órbita de un objeto astronómico que cruza el horizonte dos veces al día. El Sr. X antes (*c*) y después (*d*) de la inversión. No ha ganado en belleza, pero sí en tamaño.

Para un físico, cuya estatura se podrá despreciar, situado sobre la superficie de un planeta perfectamente redondo, el límite de la visibilidad (su "horizonte") queda determinado por el plano tangente a la esfera que pasa por su posición. Es así por la rectitud de la propagación de la luz. (En la Tierra, la refracción atmosférica hunde el horizonte de la visibilidad real respecto del horizonte geométrico en una magnitud del orden del diámetro del Sol en orto o en ocaso.)

En el mundo cóncavo, con su propagación circular de la luz, el horizonte es una esfera excéntrica que pasa por el punto central de la tierra cóncava y toca su superficie en la posición del observador. El exterior de esta esfera más pequeña resulta invisible para el observador, porque el suelo de la Tierra lo oculta. Las estrellas, los planetas y los satélites de la Tierra dan una vuelta una vez al día —aproximadamente— al punto central del mundo cóncavo en órbitas pequeñas. Durante sus trayectorias entran una vez en el área visible y luego salen de ella. Los juegos de sombras chinescas que llamamos eclipses, fases lunares, fases de Venus etc. se complican un poco, pero hay explicaciones suficientes.

Si un barco se acerca a nosotros, aparecerá primero sobre el agua la punta de su mástil: en el mundo convexo diremos con razón que el resto del barco se halla debajo de nuestro plano de horizonte tangente. La explicación en un mundo cóncavo, no obstante, tampoco resulta contradictoria: el barco viaja por el lado interior de la superficie de la Tierra, la punta de su mástil señala hacia el interior y entra primero en nuestra esfera de visibilidad, que ocupa una octava parte del volumen de la Tierra (*véase la figura 2a y 2b*).

Hagamos un experimento mental. Enviemos en una nave espacial a Júpiter, desde la superficie de la Tierra, a un robot que lleve consigo una cinta métrica larga, para medir la circunferencia de ese planeta. El robot medirá una circunferencia diez veces mayor que la del ecuador de la Tierra cóncava.

Si lo consideramos imposible, será sobre todo porque creemos que las longitudes de los objetos de cierto tipo, por ejemplo las cintas métricas, se mantienen siempre constantes. No obstante, aprendemos ya en la escuela que la longitud de las cintas métricas (y la de otros objetos) depende de la temperatura, si bien las variaciones son pequeñas. Pero la contracción relativista de la longitud a velocidades cercanas a la de la luz no es insignificante, ni mucho menos.

En la versión no rebatible de la teoría del mundo cóncavo hay que suponer que los objetos reales cambian su longitud cuando viajan hacia el interior de la esfera cóncava: cerca de su punto central se encogen, para recuperar en el regreso su tamaño anterior. Nos abstenemos de decidir si esta modificación de longitud es "real" o "aparente" y qué hay que entender por tales conceptos. El robot viajero no observará ninguna modificación de longitud, dado que se encoge a la vez y en igual proporción, y al regreso vuelve a su tamaño anterior. Así, Júpiter cabe sin esfuerzo en la esfera hueca, aunque su circunferencia decuplique la de la esfera. Quizás haga falta acostumbrarse, pero resulta más fácil de entender que algunas consecuencias de la teoría de la relatividad.

Ya va siendo hora de presentar el truco matemático crucial al cual la versión mejor de la teoría del mundo cóncavo debe su nombre: el concepto de mundo invertido.

La inversión de la esfera

Existe una transformación de coordenadas, no muy complicada, de consecuencias desconcertantes. Es apropiado llamarla "inversión" (literalmente, "vuelta hacia dentro"), porque vuelve del revés y coloca fuera lo interior, y viceversa. Una persona (o cualquier objeto) que tuviese el punto central de la esfera dentro de la barriga cambiaría drásticamente a causa de la inversión (*véase la figura 2c y 2d*). Lo mismo valdría para la Tierra invertida respecto de su propia superficie; se trata de la transformación que convierte al mundo común en mundo cóncavo, y viceversa.

Formalmente, la inversión está definida como sigue. Sea R_0 el radio de la esfera de referencia respecto de la cual se produce la inversión. Para determinar el punto imagen x' de un punto x, se traza la línea recta que pasa por el punto central de la esfera M y por x. El punto imagen x' estará situado sobre esa

recta. Las distancias *r* y *r'* de los puntos *x* y *x'* al punto central *M*, respectivamente, quedan determinadas mediante $rr' = R_0^2$. Esta proyección es unívocamente reversible, si *r* y *r'* son positivos, salvo para el punto central *M* mismo, que se proyecta al "infinito". De este modo se proyecta el interior de la esfera de referencia a su exterior, y viceversa; cada punto de la superficie se convierte en sí mismo.

En un artículo anterior vimos ya inversiones en dos dimensiones: la inversión respecto al círculo con el antiparalelogramo y con el inversor de Peaucellier [*véase* TALLER Y LABORATORIO de febrero y mayo 2008]. El matemático danés Jørgen Mohr (1640-1697) se valió de la inversión en las construcciones geométricas clásicas de regla y compás para prescindir de esta última. Un siglo más tarde, Lorenzo Mascheroni (1750-1800) tendría la misma idea.

Muchas veces, a la inversión se la denomina equívocamente reflexión sobre el círculo o la esfera, según el caso. ¡Pero una bola de Navidad no nos muestra una imagen de su entorno obtenida mediante inversión! Una buena aproximación a la inversión respecto al círculo sería un termo reflectante que tuviese una sección transversal semejante a una plancha. Eso fue descubierto y publicado por Klaus Treitz.

Volvamos a la inversión respecto de una esfera. Cada plano se proyecta como una esfera que pasa por *M*. Un plano tangente a la esfera de referencia se proyecta como una esfera que no solamente pasa por *M,* sino también por el punto de contacto con el plano tangente. Por eso debe tener un radio mitad del de la esfera de referencia. Así reconocemos los dos planos del horizonte mencionados antes, el plano euclídeo y el horizonte esférico del mundo cóncavo.

Podemos asignar un punto imagen a todos los puntos respecto de la superficie de la Tierra (idealizada como una esfera) y así pasar de nuestra descripción euclídea del mundo a la cóncava. Mientras evitemos el punto central, que es singular, y su imagen en el infinito, no tendremos problemas. Eso sí, las leyes naturales sencillas se complicarán bastante, por no hablar de las complicadas.

Un defensor del mundo cóncavo vence esta dificultad sin esfuerzo: con una inversión transforma el problema a su descripción plana, lo resuelve tal como haríamos nosotros y al final vuelve a transformarlo. Las transformaciones de ida y vuelta punto por punto son muy fáciles; pero introducidas en ecuaciones, el asunto cambia.

Recordemos la utilización de logaritmos, que antes de la calculadora de bolsillo facilitaban las multiplicaciones: alguien quiere calcular el producto de 100 metros por 1000 metros o el de 467.243 metros por 878.975.456 metros, pero le parece demasiado difícil. Entonces busca en una tabla de logaritmos la "imagen" de cada número, que se denomina logaritmo. En el primer ejemplo son los números 2 y 3, en el segundo otros números bien determinados. Después suma los logaritmos (2 + + 3 = 5 en el primer ejemplo) y busca el número cuyo logaritmo vale esa suma (el "antilogaritmo") en la tabla. En el primer ejemplo encuentra 100.000. La tarea difícil se resuelve entre una transformación de ida y una transformación de vuelta de manera mucho más fácil, en este caso como una adición. A lo largo de todo el proceso creemos que "realmente" tratamos con una multiplicación, y consideramos la transformación (en este caso la consulta en una tabla) un mero truco matemático.

El amigo del mundo cóncavo puede creer en su punto de vista y considerar que el truco está en la transformación de nuestras coordenadas. Con tal de que mantenga una distancia suficientemente grande respecto del punto central de la Tierra, no se lo podemos tomar a mal. Le reprocharemos otra cosa: que su hablar es más complicado que su calcular. Si calcula de forma euclídea, también podría describir el mundo euclídeamente con un horizonte plano, como hacemos nosotros.

La navaja de Ockham

Cuando hablamos de manera acorde con nuestro calcular, seguimos el método del "realismo hipotético": no sabemos con seguridad cómo es el mundo "de suyo", pero hablamos como si nos tomáramos nuestro vocabulario "matemático" en serio.

El teórico del mundo cóncavo obtiene los mismos resultados que nosotros, pero habla de forma más complicada.





3. Con un plano tangente a la Tierra esférica —aquí imaginada como transparente— y una fuente luminosa de tamaño puntual, el resultado es un mapa plano de la Tierra en el cual todas las geodésicas o grandes círculos (las rutas de vuelo más cortas) que pasan por el punto de contacto aparecen como líneas rectas. A la izquierda se muestra la proyección estereográfica con Frankfurt como punto de contacto y el foco luminoso en el punto antípoda. En la proyección gnomónica (*a la derecha*), con el foco luminoso en el punto central de la Tierra y el punto de contacto en el polo norte, las geodésicas se proyectan como líneas rectas.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, FUENTE: NORBERT TREITZ

Aquí recurrimos a la navaja de Guillermo de Ockham (1285-1349) para quitar barbas redundantes: lo que en una teoría se puede omitir sin que falte nada en los resultados, lo omitimos.

Tampoco un segundo principio que infringen los del mundo cóncavo guarda relación alguna con lo correcto o erróneo. Se le dio el nombre de principio copernicano en honor de quien revitalizó la visión del mundo de Aristarco, según la cual el Sol descansaba en el centro del mundo, mientras que en la concepción del mundo que Tolomeo resumió en su *Almagesto*, la Tierra ocupaba ese lugar.

En realidad, ambas concepciones son sólo sistemas de coordenadas. Aunque igualmente correctas, representan grados de comodidad diferentes. En lo que a eso se refiere, el sistema de Copérnico sólo resulta superior si se incluyen la masa y la gravedad; para materializarlo, hubo que esperar a Newton. Sin ambas, y desde el punto de vista puramente cinemático, los compromisos de Heráclides del Ponto (*circa* 390-322 a.C.) y de Tycho Brahe (1546-1601) poseen una elegancia cautivadora. Es cierto que ambos pusieron la Tierra en el centro del mundo e insistieron en que el Sol giraba alrededor de la Tierra. Pero los planetas tenían el Sol en vez de la Tierra como centro de sus órbitas. Así, Heráclides y Brahe explicaron todo lo que podemos ver sin obligarnos a creer que vivimos en una esfera que gira y surca el espacio velozmente.

El principio que hoy en día se llama copernicano no trata de si el Sol reposa en el centro del mundo o no; al fin y al cabo, el Sol no reposa en el centro de nada. Se trata más bien de un criterio que hemos hecho nuestro en los últimos siglos siguiendo al tímido clérigo de Frauenburg y a su seguidor Galileo, bastante dado a asomarse peligrosamente por la ventana y a pasarse de la raya: no hay que tomar el ombligo propio o el centro del planeta natal por el centro del universo, aunque ingenuamente así lo parezca y aunque en la forma de sistema de referencia del laboratorio se produzca así una manera conveniente de describir las cosas. Hasta los astrónomos hablan de la salida y la puesta del Sol.

El principio copernicano de la cosmología moderna dice que nuestras leyes naturales gozan de igual validez en todas partes, incluidas, por tanto, nuestra galaxia y nuestro maravilloso planeta azul.

La Tierra discoidal

Quien sea capaz puede incluso imaginarse la superficie de la Tierra como un plano, con el mismo fundamento que el de nuestros amigos del mundo cóncavo. Para colmo, los que defienden la esfericidad de la Tierra emplean la transformación al plano para crearle planisferios.

Tomemos como esfera de inversión no la superficie de la Tierra, sino una esfera de radio doble que toque nuestra Tierra donde nos gustaría tener el ombligo del mundo, digamos que en el aeropuerto de Frankfurt. Entonces, la superficie de la Tierra pasa por el punto central de la esfera de inversión —el cual se encuentra en alguna parte de las aguas de Nueva Zelanda—; así, su imagen proyectada es un plano. La proyección, excepto por un factor de 2, es exactamente la inversión de la que proyecta el horizonte euclídeo en la esfera del horizonte del mundo cóncavo.

En un mapa de la Tierra construido de esta manera, los trayectos más cortos a partir de Frankfurt (las geodésicas sobre la superficie de la Tierra) aparecen como líneas rectas (*véase la figura 3*). La "proyección estereográfica" desde el plano (complejo) sobre la esfera (de números de Riemann) presta un servicio valioso a las matemáticas.

Hemos visto mediante la variante irrebatible de la teoría del mundo cóncavo que la corrección no es el criterio único que determina la utilidad de una teoría. He aquí otros ejemplos: "π no es igual a 4" es correcto, pero no tan útil como la declaración errónea "$\pi = 3{,}15$". Es útil describir como homogéneo el campo eléctrico en un condensador de placas paralelas, si bien en sus bordes es erróneo en un factor de 2. El campo gravitatorio y el campo magnético de la Tierra no son homogéneos a gran escala, pero a escala de laboratorio lo son con gran exactitud.

Roman U. Sexl solía acabar sus disertaciones sobre el mundo cóncavo con un clímax, si el maestro de ceremonias no le reventaba el efecto: "Y ahora Sexl nos explicará cómo se puede comprobar con ayuda de la curvatura de las suelas de los zapatos que la teoría del mundo cóncavo es correcta."

¿Qué son los números?

Reflexiones filosóficas sobre la naturaleza de los objetos matemáticos

Agustín Rayo

Sabemos mucho sobre números. Sabemos que 2 + 2 = 4, que hay infinitos números primos, que $e^{i\pi} = -1$, y muchísimas cosas más. Pero, ¿qué son los números? En la nota de este mes, consideraré tres respuestas diferentes.

1. El platonismo tradicional

De acuerdo con el platonismo tradicional, los números existen en el mismo sentido de "existencia" en el que existen las estrellas y los elefantes. Para hacer un inventario de todo lo que hay en el mundo, no bastaría con nombrar las morsas y las lunas, los neutrinos y los volcanes. Aunque hayamos conseguido nombrar todos los objetos físicos —todos los objetos que existen en el espacio y en el tiempo— nos quedarán por considerar los objetos abstractos: las funciones y los conjuntos, las líneas y los vectores. Y, por supuesto, los números.

Esta manera de pensar tiene una ventaja y muchísimas desventajas. La ventaja es que nos proporciona una explicación inmediata de qué es lo que decimos cuando hacemos aseveraciones matemáticas. Decir que el número siete es impar, por ejemplo, es como decir que Susana corre. En ambos casos estamos hablando de un objeto particular que existe en el mundo —el número siete en un caso, Susana en el otro— y le estamos atribuyendo una propiedad: la propiedad de ser impar en un caso, la propiedad de correr en el otro.

Pensemos, sin embargo, en las desventajas. En primer lugar, preguntémonos cómo es que los matemáticos adquieren sus conocimientos específicos. De acuerdo con el platónico, el dominio de los objetos abstractos está fuera del espacio y el tiempo. No puede existir, por lo tanto, proceso causal alguno que nos permita observar el mundo de los números. ¿Cómo podríamos adquirir información sobre un mundo absolutamente inobservable? Y bajo tales circunstancias, ¿qué les podría dar a los matemáticos la certeza de que sus axiomas son verdaderos?

Otro problema es que el platónico nos imputa un interés en la metafísica que no parecemos tener. Supongamos que estoy decidiendo si sentar a mis invitados en una mesa redonda o rectangular; Joaquín me avisa: "Ten en cuenta que el número de comensales será impar". De acuerdo con el platónico, el número de los comensales —como todos los números— es un habitante del dominio de los objetos abstractos. Resulta, por tanto, que el comentario de Joaquín entraña una especulación sobre la realidad extrafísica. Y eso no parece oportuno. Sería inapropiado, por ejemplo, que yo objetara al comentario con un rechazo de la metafísica platónica: "No, Joaquín, vivimos en un mundo puramente físico, así que eso que me dices acerca del número de comensales no puede estar bien."

2. El consecuencialismo

Una alternativa al platonismo es el consecuencialismo. Declara éste que las aseveraciones matemáticas son, en realidad, aseveraciones acerca de la existencia de *pruebas* matemáticas. Cuando enunciamos que hay un número infinito de números primos, lo que realmente queremos decir es que el enunciado "hay un





Imaginemos que Dios creó el mundo. El platónico moderado diría que bastó con que Dios creara los objetos físicos para que fueran verdaderas todas las verdades matemáticas. De acuerdo con el platónico tradicional, en cambio, la existencia de los números requirió un acto de creación adicional.

número infinito de números primos" puede probarse a partir de los axiomas de la aritmética.

El consecuencialismo nos permite evitar algunos de los defectos del platonismo. En primer lugar, el consecuencialista no está comprometido con la existencia de números. Para que una aseveración de "5 + 7 = 12" sea correcta, no es necesario que existan los números 5, 7 y 12. Basta con que sea posible probar "5 + 7 = 12" a partir de los axiomas de la aritmética.

En segundo lugar, el consecuencialista puede explicar por qué los matemáticos pueden adquirir sus conocimientos específicos. Puesto que los enunciados matemáticos no describen un dominio especial de objetos abstractos, sino sólo hechos de derivabilidad lógica, lo único que tiene que hacer un matemático para justificar un enunciado es asegurarse de que haya una prueba del enunciado aseverado a partir del sistema axiomático pertinente.

El consecuencialismo tiene, sin embargo, un par de limitaciones importantes. En primer lugar, el teorema de Gödel implica que ningún ser finito podría estar en posición de especificar un conjunto de axiomas del que puedan derivarse todas y sólo las verdades aritméticas (o todas y sólo las verdades de otras ramas de las matemáticas). En este sentido, cualquier sistema axiomático que seamos capaces de especificar será incompleto. El consecuencialista tendrá que decir, por tanto, que hay enunciados matemáticos que no contarían ni como correctos ni como incorrectos, dado que ni ellos ni sus negaciones serían derivables del sistema axiomático pertinente.

Otra limitación del consecuencialismo es que no ofrece ninguna explicación de por qué la matemática aplicada es útil. Decir que hay un número primo de niños en el jardín es útil, por ejemplo, porque nos permite predecir que la única manera de poner a los niños en formación (sin sobrantes) es en una sola fila. Pero esta predicción no se sigue de la observación de que el enunciado "hay un número primo de niños en el jardín" sea derivable a partir de algún sistema axiomático. Necesitaríamos, además, razones para pensar que el sistema axiomático en cuestión es *verdadero*. Y el consecuencialismo no nos da ninguna manera de evaluar los sistemas axiomáticos con respecto a su verdad o falsedad. Al consecuencialista lo único que le importa es qué enunciados pueden probarse a partir de qué sistemas axiomáticos.

3. El platonismo moderado

En mi opinión, la mejor manera de dar cuenta de la naturaleza de los números es adoptando un platonismo moderado. De acuerdo con el platonismo moderado, un mismo hecho del mundo puede describirse de maneras muy distintas.

Consideremos, por ejemplo, el hecho de que se celebró una boda. Este hecho podría describirse afirmando que alguien se casó. Dicho de otro modo: no hay ninguna diferencia entre el hecho de que se celebrase una boda y el hecho de que alguien se haya casado. Estamos utilizando palabras diferentes —"se celebró una boda", en un caso; "alguien se casó", en el otro— para decir lo mismo acerca de cómo es el mundo.

El platónico moderado propone que con los números sucede algo similar. Consideremos, por ejemplo, el hecho de que no hay unicornios. Este mismo hecho podría haberse descrito diciendo: el número de los unicornios es cero. En un caso se habla de números y en otro no. Pero de ello no se sigue que estemos diciendo cosas diferentes acerca de cómo es el mundo. Estamos utilizando *palabras* diferentes —"no hay unicornios", en un caso; "el número de los unicornios es cero", en el otro— para decir lo mismo acerca de cómo es el mundo.

Aportemos dos casos más de hechos que pueden describirse hablando de números y sin hablar de números. (1) Si hay exactamente tantos niños como niñas, este hecho puede describirse sin hablar de números ("hay exactamente tantos niños como niñas"), pero también puede describirse hablando de números ("el número de los niños es igual al número de las niñas"). (2) Si el número de los comensales es impar, este hecho puede describirse hablando de números ("el número de los comensales es impar"); puede también describirse sin hablar de números ("Los invitados no pueden emparejarse de manera que no sobre nadie").

(¿Existe algún método general para reescribir enunciados matemáticos como enunciados no matemáticos? La respuesta es complicada. Véase el primero de los dos artículos de la bibliografía.)

Al igual que el platonismo tradicional, el moderado postula la existencia de números. Pero a diferencia del primero, el platonismo moderado resiste la idea de que la existencia de los números sea algo más allá de la existencia de los objetos físicos.

El punto puede ilustrarse imaginando que Dios creó el mundo. El platónico moderado diría que sólo tuvo que preocuparse por crear morsas y lunas, neutrinos y volcanes. La existencia de los objetos matemáticos no requirió una intervención *adicional*.

Cuando Dios creó el sistema solar, por ejemplo, ya había hecho todo lo que tenía que hacer para garantizar que el número de las lunas terrestres fuera uno, pues el hecho matemático de que el número de las lunas terrestres sea uno no es más que el hecho no matemático de que haya exactamente una luna terrestre; y de ese hecho ya se había encargado Dios cuando creó el sistema solar.

El platonismo moderado ofrece soluciones a todos los problemas que habíamos discutido antes. Para empezar explica de qué modo los matemáticos adquieren su conocimiento. De acuerdo con el platónico moderado, los hechos matemáticos no tienen que ver con un dominio misterioso de objetos abstractos que existe independientemente del mundo físico. Los hechos matemáticos son simplemente hechos físicos, descritos de manera diferente.

El platonismo moderado también nos proporciona una explicación de la utilidad de la matemática aplicada. Cuando decimos que hay un número primo de niños en el jardín, estamos empleando vocabulario matemático para describir el hecho físico de que los niños sólo pueden ponerse en formación (sin sobrantes) si se utiliza una sola fila. No es ningún misterio, por lo tanto, que la afirmación de que hay un número primo de niños en el jardín resulte relevante para el proyecto de poner a los niños en formación.

Agustín Rayo es profesor asociado de filosofía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.

¿Quiere saber más?

La columna de este mes es una versión simplificada de mi artículo 'Neo-Fregeanism Reconsidered', por aparecer en *Abstractionism in Mathematics - Status Belli*, coordinado por Ebert y Rossberg; Oxford University Press.

Gabriel Uzquiano discute el Neofregeanismo —una versión del platonismo moderado— en 'Juegos Matemáticos', *Investigación y Ciencia*, octubre, 2008.

Propulsión a chorro

Un poquito más

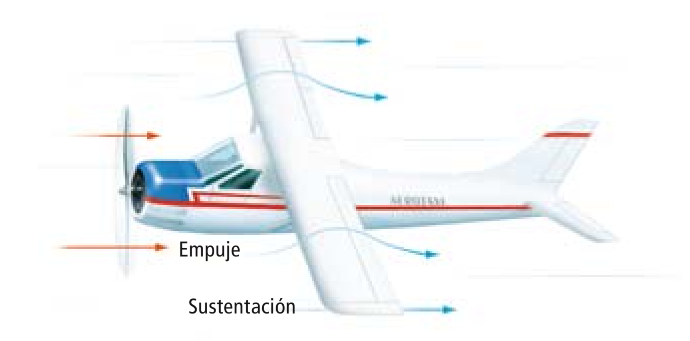
Mark Fischetti

Corro hacia mi vuelo de enlace, presuroso muestro mi pasaje justo a tiempo y por fin me abro paso hasta mi asiento. El avión se separa de la puerta de embarque y el motor se revoluciona. A la vez que suspiro con alivio, atisbo por la ventana y me pregunto: ¿Y qué me va a propulsar hasta la troposfera? La respuesta para la mayoría de los aviones comerciales de hoy es "unos motores turbofan", lo último de una evolución que dura decenios. Primero fueron los turborreactores, ya obsoletos; luego los turbohélices, que se encuentran todavía en aviones pequeños. El gran avance de los turbofan (turboventiladores) es que la hélice está remplazada por un ventilador interior a la nacela (la barquilla o envuelta del motor); buena parte del aire de admisión puentea las entrañas del motor y proporciona empuje simplemente por la compresión que le produce el ventilador.

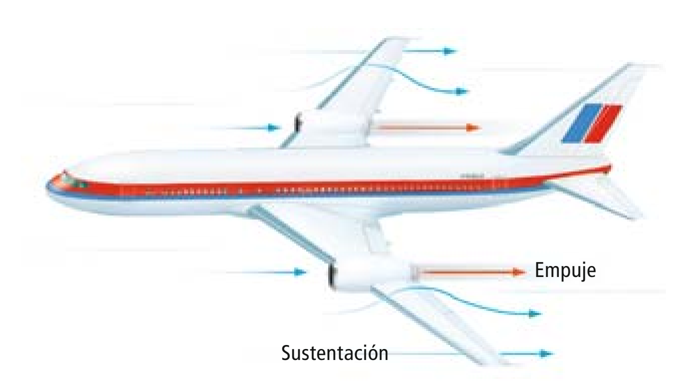
El motor de propulsión a chorro se basa en principios físicos archiconocidos. Según la tercera ley de Newton (a cada acción le corresponde una reacción igual y contraria), el aire que sale proyectado por detrás a mayor velocidad que el avión impulsa éste hacia adelante. El ventilador añade energía a la corriente de aire, con lo que aumenta la velocidad.

En los motores turbofan de alta derivación, fluyen alrededor del motor de seis a ocho kilogramos de aire por cada kilogramo de aire que pasa por su interior. Cuanto mayor es ese índice de derivación, mayor es el rendimiento del combustible y menos ruidoso el motor. Para elevar ese índice hay que proceder por pasos. "Para optimizar la combinación de prestaciones del motor, emisiones y ruido hay zonas favorables", dice Dale Carlson, gerente de tecnología avanzada en GE Aviation en Evendale (Ohio). Nuestro objetivo consiste en diseñar sistemas que optimicen esas zonas favorables.

Mientras las aerolíneas (un sector ya aquejado de problemas financieros) contemplan cómo el precio del combustible se pone por las nubes, lo único y primordial ha pasado a ser la gestión económica. "Aumentar el rendimiento del combustible en sólo un 5 por ciento ya sería un logro notable", afirma Gary Roberge, director de tecnología avanzada en Pratt & Whitney, Hartford (Connecticut). Los ingenieros están ensayando envueltas de termoplástico y piezas de motor de aluminio para reducir el peso; desarrollan también aleaciones de níquel y compuestos cerámicos que soportan temperaturas mayores para conseguir una combustión más eficiente del combustible. Siguen concibiéndose nuevos diseños, pero Roberge opina que los motores turbofan seguirán dominando durante los próximos 10 o 20 años.



1. LOS MOTORES TURBOFAN se valen de un ventilador ("fan" en inglés) para aspirar el aire. El aire se separa en dos corrientes. El ventilador eleva la presión del "aire derivado" (o secundario) hasta unas dos veces la del ambiente. El "aire primario" atraviesa un compresor rotatorio cuyas paletas elevan su presión entre 30 y 40 veces y su temperatura en unos 560 grados Celsius o más. El aire penetra luego en el combustor, donde se mezcla con el combustible y se inflama. El aire hipercalentado se descarga sobre las turbinas y las hace girar. El gas descargado de las turbinas, aún a gran presión, sale por una tobera que se estrecha gradualmente; se consigue así un empuje adicional. La turbina de alta presión acciona los compresores de alta presión; la turbina de baja presión acciona los compresores de baja presión y el ventilador.



2. LOS MOTORES DE HELICE Y LOS DE REACCION generan el empuje impulsando el aire hacia atrás. En ambos casos, como la cara superior del ala es curva y la inferior plana, el aire que discurre en contacto con la cara superior debe recorrer una distancia mayor y, por tanto, a mayor velocidad que el aire que discurre en contacto con la cara inferior. Según el teorema de Bernoulli, el aire más lento que se mueve por debajo del ala ejerce sobre ésta una fuerza mayor que el aire más rápido que se mueve por encima de ella. Así se sustenta el avión en el aire.

KENT SNODGRASS *Precision Graphics*

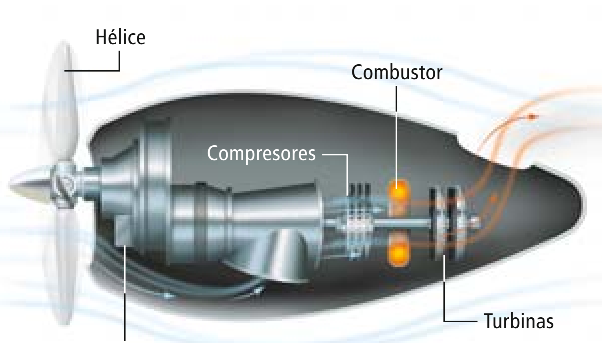
¿SABIA USTED QUE...?

ENGRANAJES: El aumento del cociente entre el aire secundario y el aire primario mejora el rendimiento del motor y reduce el ruido acústico. Pero más aire secundario requiere un ventilador y una turbina trasera de mayor tamaño; cuando el ventilador gira rápido, las puntas de las aletas de éste pueden alcanzar velocidades supersónicas elevadas, con la generación consiguiente de un ruido asociado a las ondas de choque. Pratt & Whitney trabaja en un turbofan engranado (un motor turbofan con una caja de engranajes instalada justo tras el ventilador). Los engranajes permitirían unos índices de derivación elevados, al tiempo que mantendrían unas velocidades de ventilador menores y más silenciosas.

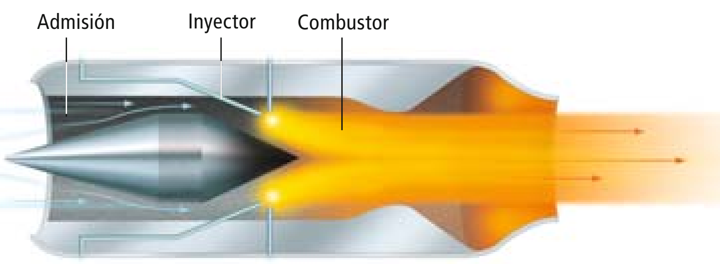
COMBUSTION SUPERSONICA: Un estatorreactor de combustión supersónica funciona de modo similar a un estatorreactor, salvo que la velocidad del aire de admisión no se rebaja a valores subsónicos. Los estatorreactores pierden eficiencia por encima de Mach 5; los estatorreactores de combustión supersónica, en cambio, pueden operar a velocidades superiores. El avión prototipo X-43, de servicio en la NASA, voló a casi Mach 10 en noviembre de 2004; sin embargo, el ritmo de trabajo se redujo a causa de cambios presupuestarios. También Rusia ha puesto prototipos en vuelo.

TOSTADAS: Los turbofan y los turbohélices pertenecen a una clase de motores conocidos como turboejes. Variantes de ellos propulsan helicópteros militares, los tanques M1 y hélices marinas de gran potencia. Las turbinas de gas industriales, empleadas en las centrales eléctricas, guardan gran semejanza con los motores de propulsión a chorro de tipo turbofan, aunque sin aire secundario. El aire de descarga sale a gran presión para accionar una turbina acoplada a la salida, que a su vez arrastra el árbol de un generador eléctrico, que produce la corriente que consumimos en casa para hacer tostadas.

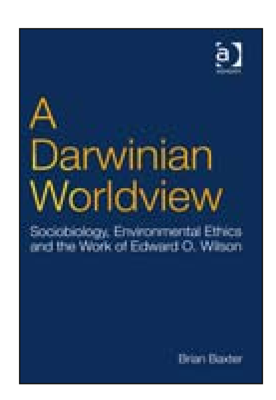
Aire derivado
Turbina de alta presión
Ventilador
Turbina de baja presión
Nacela
Compresores de baja presión
Compresores de alta presión
Combustor



3. LOS TURBOHELICES emplean una hélice en lugar de un ventilador. Los compresores elevan la presión del aire entrante y el combustor inflama el combustible en el seno del aire, impulsando la mezcla a través de las turbinas que accionan la hélice. Esta genera la mayor parte del empuje, no el chorro de descarga.

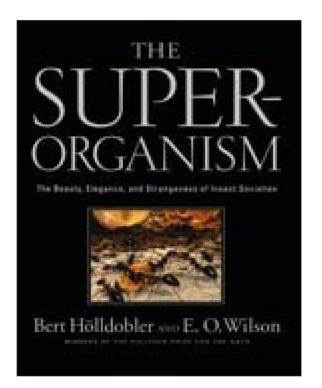


4. LOS ESTATORREACTORES tienen muy pocas piezas móviles. Propulsan cazas y mísiles a velocidades de Mach 2 a Mach 4. Un motor de reacción independiente o un cohete deben acelerar el aparato hasta más allá de la velocidad del sonido; para cebar el estatorreactor fuerza la entrada de aire supersónico en la cámara de admisión. La cámara aminora entonces la velocidad del aire. El combustor inflama el combustible en el seno del aire subsónico y el gas, al expandirse, crea el empuje. El difusor de admisión está dotado de unas aletas móviles que alteran a voluntad, en función del empuje deseado, el flujo de aire.



A DARWINIAN WORLDVIEW. SOCIOBIOLOGY. ENVIRONMENTAL ETHICS AND THE WORK OF EDWARD O. WILSON,

por Brian Baxter. Ashgate; Aldershot, 2007.



THE SUPERORGANISM. THE BEAUTY, ELEGANCE, AND STRANGENESS OF INSECT SOCIETIES,

por Bert Hölldobler y Edward O. Wilson. WW. Norton and Company; Nueva York, 2009.

Sociobiología

Fuerza explicativa de la organización altruista de las colonias

Bert Hölldobler y Edward O. Wilson ganaron en 1991 el premio Pulitzer con *The Ants* ("Las hormigas"). Con *The Superorganism* amplían la perspectiva a todos los insectos sociales. Estructura intermedia entre los organismos y los ecosistemas, los individuos forman las unidades del superorganismo, elemento componente, a su vez, del ecosistema. Las colonias integrantes mantienen un estrecho vínculo interno a través de una cooperación altruista, comunicación compleja y división del trabajo. De acuerdo con los autores, la cohesión intragrupal depende de la competición intergrupal, sean los grupos células, organismos o sociedades. No hay una sin la otra.

Los organismos no evolucionan. Evolucionan las poblaciones. Pero los organismos tienen ontogenias. La sociogénesis del superorganismo —crecimiento y desarrollo de la colonia— admite una comparación fecunda con la embriogénesis. La especialización funcional y la división del trabajo entre las partes de un conjunto global mayor se encuentran en numerosos niveles. Las ideas de Darwin sobre la división del trabajo se inspiraron en Henri Milne-Edwards, a quien dedicó un volumen de su monografía sobre los cirrípedos.

La mayoría de las formas sociales son insectos, animales de seis patas, dos antenas en la cabeza, cuerpo segmentado en tres partes, que viven en tierra firme. Alcanzada la madurez, forman colonias de número variable, desde 10 miembros escasos hasta 20 millones de individuos, según la especie. Los miembros de cada colonia se encuentran divididos en dos castas básicas: un número muy restringido de reproductoras y otro muy alto de obreras que desarrollan el trabajo de una manera altruista. En su inmensa mayoría, las especies coloniales pertenecen al orden Hymenoptera (hormigas, abejas y avispas). Los miembros de la colonia son hembras. Producen y cuidan de los machos durante el breve período anterior a la estación de cópula. Los machos no trabajan. Tras la estación de cópula, cualquier zángano que siga en el nido será expulsado o matado por sus hermanas obreras. Sólo en el orden Isoptera (termes), un rey vive con la reina, la hembra reproductora. A diferencia de las obreras himenópteras, la fuerza de trabajo de los termes está integrada por miembros de ambos sexos; en algunas especies, existe cierta división sexual del trabajo.

Hormigas, abejas, avispas y termes constituyen más de dos tercios de la biomasa de insectos, aunque comprenden sólo el dos por ciento de las aproximadamente 900.000 especies de insectos conocidas. En un recodo de la pluviselva amazónica, cerca de Manaus, donde se llevó a cabo un recuento real, los insectos sociales componían el 80 por ciento; sólo hormigas y termes componían casi el 30 por ciento de la biomasa animal total; sólo las hormigas pesaban cuatro veces la suma de mamíferos, aves, reptiles y anfibios. La dominación ambiental de hormigas y otros insectos sociales es el resultado de un comportamiento grupal cooperativo. En la pluviselva tropical, las hormigas en su conjunto pesan más que todos los mamíferos y otros vertebrados terrestres. La reina de una colonia de hormigas del género *Atta* puede vivir hasta 10 años y dejar 150 millones de progenie que trabajarán como sus obreras. Cuando una muchedumbre de obreras realiza las mismas tareas, utiliza series, de operaciones en paralelo; cada obrera puede cambiar de una tarea a otra según lo demande la necesidad, de suerte que ninguna tarea esté mucho tiempo desatendida y las distintas etapas de la tarea puedan cumplirse con celeridad. Las obreras se muestran también más proclives que los insectos solitarios a la agresividad y al suicidio.

Uno de los rasgos distintivos de las sociedades de insectos estriba en las "castas estériles". El fenómeno constituía un espinoso contraejemplo de la tesis de la selección natural, expresada por el propio Darwin en términos de reproducción supernumeraria. ¿Cómo podían las castas obreras de hormigas y otros insectos sociales haber evolucionado, si son estériles y no dejan descendencia? La respuesta no se le escapó a Darwin: el objetivo de la selección era ahí la familia, no el individuo. En el caso de las castas estériles, razonaba, constituye una ventaja para su comunidad que sacrifiquen tiempo y energía en la prosperidad de la colonia. Pero pasó por alto un detalle importante. Al considerar genéticamente uniforme la colonia, simplificó en demasía la evolución social. Desconocía lo que entrañaba la meiosis y la recombinación mendeliana. Y no podía apreciar que en muchas especies las obreras tenían ovarios, aptos para la reproducción. En otras palabras, las obreras eran rivales reproductoras potenciales de su progenitora y entre ellas.

El problema de las obreras estériles no quedó, pues, resuelto con Darwin.

Comprobada la herencia particulada y recombinante en el siglo XX, correspondería a Alfred H. Sturtevant en 1938

percatarse de que la evolución en los insectos sociales venía instada no sólo por uno, sino por tres niveles de selección: las fuerzas que operan entre miembros de la misma colonia, las que intervienen entre colonias y las que se ejercen entre poblaciones de colonias. Además, la selección puede desarrollarse de forma concertada, haciendo la cooperación altruista y la evolución social más verosímil, o actuar de forma antagónica entre sí, con el consiguiente retraso, estancamiento o incluso reversión de la evolución social.

En 1945, Sewall Wright, uno de los arquitectos de la síntesis moderna de la teoría de la evolución, abordó la selección de multiniveles en busca de una justificación científica del altruismo. Pero en 1932, J. B. S. Haldane, otro puntal del neodarwinismo, había ya observado que el altruismo pudo haberse desarrollado si semejante conducta suponía una ventaja genética para los familiares. Fue en el marco de la genética de poblaciones cuando, en 1955, Haldane aportó una solución razonable del problema del altruismo. Dos años más tarde, G. C. Williams y D. C. Williams aunaron selección de grupo y selección de parentesco.

En 1964, William D. Hamilton publicó su teoría genética de la evolución social. Puso los fundamentos matemáticos de la selección de parentesco y la expresó en la teoría más general de eficacia biológica inclusiva. La regla de Hamilton establece que un carácter altruista hereditario se difundirá por la población si *rb es mayor que c*, donde *b* es el incremento en unidades de descendencia producidas por el receptor del comportamiento altruista, *r* es la fracción de genes que el altruista comparte con el receptor y *c* es el coste del altruista medido en unidades de descendencia. Hamilton generalizó la regla.

Propuso lo que más tarde dio en llamarse la hipótesis de la haplodiploidía. Las especies del orden Hymenoptera determinan el sexo mediante la haplodiploidía. Los huevos que son haploides (no fecundados), y cuyos genes por ende constan enteramente de la mitad de los genes de la madre, devienen machos. Por el contrario, los huevos que son diploides (fecundados), y cuyos genes vienen la mitad de la madre y la mitad del padre, resultarán en hembras. En virtud de la haplodiploidía, se establece una extraña red asimétrica de relaciones genéticas entre parientes próximos. Todos los genes de un macho son idénticos a la mitad de los genes de su madre; el grado de relación genética de hijo y madre es, pues, de un medio. Cada hembra comparte la mitad de sus genes con su madre (grado de parentesco un medio), pero sólo un cuarto con cada hermano y (ésta es la clave de la hipótesis de la haplodiploidía) tres cuartos con cada hermana. Si la madre de una colonia se aparea sólo una vez, todos los miembros de la familia guardan un estrecho parentesco. Se pensó que esa circunstancia impulsaba la evolución de la autoinmolación por los miembros de la colonia.

Mas, pese a todo, no se olvide que los termes (Isóptera), aunque sociales, son diploides. Por si fuera poco, la mayoría de los linajes de Hymenoptera son solitarios. De donde cabe inferir que la haplodiploidía no es ni necesaria ni suficiente para la evolución de la socialidad.

El estudio de los superorganismos ha iluminado numerosos fenómenos de interés general en biología. Las obreras de las abejas melíferas, lo mismo que las hormigas, se comunican con sus compañeros de colmena u hormiguero y los encaminan hacia fuentes lejanas de comida; se exhibe la regulación del consumo alimentario por la comunidad o se sigue un ritual de combate. Algunas especies de hormigas retiran del nido a las moribundas. Las cortadoras de hojas, en particular, poseen complejos sistemas de comunicación, un sistema de castas muy elaborado, una arquitectura del nido con aireación y población por millones.

Más del 90 por ciento de las señales utilizadas en la comunicación por los insectos sociales son de naturaleza química, en particular feromonas segregadas por glándulas exocrinas que, percibidas por otros miembros de la colonia, evocan una respuesta de alarma, atracción, congregación o reclutamiento. Los sonidos y las vibraciones ligadas al substrato intervienen también en los procesos de comunicación. Cada colonia refleja un elevado grado de integración, posibilitado por el sistema de comunicación y de división del trabajo, propiedades distintivas del superorganismo. En cuya estructuración encontramos un escalón “primitivo”, representado por especies donde los miembros de la colonia retienen su potencial reproductor y existe una pugna reproductora interindividual intensa. En un cabo del espectro de la evolución social de las hormigas encontramos las de anatomía primitiva *Prionomyrmex macrops*, de Australia, y especies del género cosmopolita *Amblyopone*. Sus colonias, con menos de un centenar de obreras, emplean sólo señales elementales de comunicación. Se comprometen en una sumaria división del trabajo más allá de la distinción entre reina y obreras; construyen hormigueros simples. En el otro cabo, hallamos las hormigas cortadoras de hojas de los géneros *Atta* y *Acromyces*, y las hormigas tejedoras del género *Oecophylla*, en que la casta de la reina es la única reproductora, mientras que el resto, cientos de miles de obreras estériles, se integran en subcastas, encuadradas en sistemas de división del trabajo; han desarrollado una división compleja del trabajo y sistemas de comunicación. Entre los dos extremos, ocupando todos los espacios imaginables del gradiente, encontramos miles de otras especies. Juntas aportan una visión clara de los orígenes evolutivos de los grados intermedios y avanzados de superorganismo.

El concepto de superorganismo reconoce un precedente directo en el escrito de William Morton Wheeler sobre “la colonia de hormigas como organismo”, de 1911. Postulaba que la noción trascendía la mera metáfora. Reconocía en la colonia varias notas, características del organismo: se comporta como una unidad; muestra conducta, tamaño y estructura peculiares; acomete un ciclo de desarrollo y reproducción adaptativo; distingue entre “plasma germinal” (reinas y machos) y “soma” (las obreras). En una obra publicada en 1928, *The Social Insects, Their Origin and Evolution*, Wheeler denominaba ya superorganismo a una colonia de insectos sociales. Apuntaló el concepto de homeostasis social, constituida por procesos fisiológicos y conductuales en cuya virtud la colonia se mantiene en condiciones óptimas para el desarrollo y la reproducción.

Desde los años cincuenta la investigación en comunicación química, fisiología y evolución de los sistemas de castas en diversas especies de hormigas desempeñó un papel fundante de la sociobiología. La disciplina se asentaría en los setenta y ochenta, con la convergencia de la fisiología, la ecología y la teoría evolutiva, síntesis en la que los insectos sociales representaban un papel central. En 1975 Wilson publicó su *Sociobiology: the New Synthesis*. Hacia el cierre de ese intervalo,

la atención se centró en las fuerzas de selección que conforman la estructura y ciclos biológicos de la colonia. En los años noventa, los avances correspondieron al análisis de la autoorganización de las colonias, la sociogenética, o inquisición sobre el parentesco entre colonias y entre miembros de una colonia, cuyo remate contemporáneo lo sella la secuenciación del genoma de insectos. Con todo, una vez más, la meta ya estaba trazada de antemano, la conducta del hombre, si altruista unas veces o si egoísta siempre (*A Darwinian Worldview*).

Junto a la axiomática declaración de que *Homo sapiens* constituye una especie animal, se reconoce su aparición en el curso de un proceso evolutivo a través del mecanismo darwinista de selección natural. La explicación de su comportamiento habrá de requerir las raíces en la filogenia y etología comparada. Aunque existen fuertes discrepancias en el peso que en dicha explicación deba concederse a la selección y el que merece reservarse para la cultura.

La sociobiología confía en descubrir estructuras cerebrales, redes o circuitos nerviosos que gobiernen la conducta humana en sus trazos fundamentales. Se habrían adquirido durante el largo período del Pleistoceno y confirieron a sus poseedores una ventaja reproductora. Gould y Lewontin se mostraron menos dispuestos a conceder esa fuerza absoluta a la selección natural, superada en numerosos casos, rasgos y propiedades.

La sociobiología aplicó a organismos distintos del hombre conceptos clave, desarrollados por Georges Williams, Robert Trivers y otros. Se debe a Williams la visión egoísta del gen (popularizada por Dawkins) en el marco de su investigación sobre el beneficio de la autoinmolación en beneficio del grupo. La idea del gen egoísta se encuentra así tras la explicación de altruismo en términos de la teoría de William Hamilton sobre la selección de parentesco y eficacia biológica inclusiva; tras la explicación de Trivers sobre los conflictos progenitores-progenie y tras su exposición de la evolución del altruismo recíproco entre pequeños grupos de animales; y tras la aplicación por Maynard Smith y Price de la teoría de juegos a la explicación evolutiva del comportamiento humano en aquellos casos en que la ventaja de una pieza en un sujeto depende de lo que otros estén haciendo.

Luis Alonso



UNA FUNDAMENTACION DE LA HISTORIA DE LAS MATEMATICAS,

por Jesús Hernando Pérez Alcázar. Editorial Universitaria; Universidad Pedagógica Nacional; Bogotá, 2007.

Matemática

Creación e historia

Profesor emérito de la Universidad Nacional de Colombia, Jesús Hernando mantiene una actividad docente e investigadora en la Universidad Sergio Arboleda, donde dirige un seminario bajo el nombre *El Semicírculo*, uno de cuyos resultados es el breve libro del que aquí se da noticia. El objetivo central del mismo es "ayudar a mejorar las condiciones para el desarrollo de la investigación en la Historia de las Matemáticas" al igual que el reconocimiento de esta disciplina en el mundo académico colombiano. Un objetivo que podría aceptarse igualmente para un medio como el español.

Hernando articula su libro en ocho capítulos. Expone once principios que orienten el trabajo investigador, principios que acompaña de justificación teórica y de ejemplos apoyados en documentos historiográficos. Once principios convertidos en "axiomas" de las teorías que, obligadamente, acompañan y orientan el desarrollo de cualquier tipo de investigación, en este caso la histórica de las matemáticas.

Enumero aquí esos principios: de Durkheim o de la división social del trabajo, principio ético y legal, académico o de la dialéctica, imaginarios *versus* teorías, de historicidad, de tensión entre finito e infinito, anfibiótico o de la teoría entre ser y no ser, de Struik o de la dignificación de la especie humana, de contextualización de Dehn, de la excelencia literaria, de Alberto Campos o de la tensión entre historia y educación, de María Losada o de la teoría entre niveles.

Es claro que así enumerados no muestran la riqueza conceptual ni la problemática que encierran. Sólo aclarar algún punto. El principio anfibiótico impone una condición que, en sí, parece banal pero que tiene grandes dificultades tanto para ser llevado a la práctica como para ser aceptado por los matemáticos "puristas" o "profesionales".

Jesús Hernando exige que el historiador de la matemática sea un anfibio: matemático pero también historiador. No basta ser espectador o "aficionado" en uno u otro de los campos, hay que poder respirar los aires de la matemática y de la historia.

Querría destacar dos puntos más. Por un lado, la discusión en torno al imaginario, al conjunto de imágenes que todo individuo, también el investigador, posee acerca de cada uno de los aspectos de la *physis*, de los comportamientos individuales, de los sistemas conceptuales; también, claramente, del hacer matemático. E insiste en el peligro que supone para la investigación conceptual, crítica, la asunción sin más de algún imaginario. Como posible defensa, mantiene la aceptación de un proceso como el evaluador, un proceso que, bien llevado, puede ayudar a sortear el peligro mencionado.

Hay otro objetivo en la obra de Hernando; se plasma en los dos últimos principios. En ellos se alude a la matemática y a la enseñanza. Se admite la existencia de tres niveles (elemental, superior, avanzado) en la actividad matemática y se reconoce que la investigación histórica se ha centrado en los dos últimos estadios. Aquí se apuesta por el cultivo también del primero, del nivel elemental, que tiene más profundidad de la que se piensa en el imaginario colectivo. Y desde ese cultivo, trata de elevar la educación matemática y, con ella, por el principio de Struik de dignificación de la especie humana, elevarla al máximo nivel posible.

El libro está magníficamente escrito, con una amenidad que no impide la profundidad conceptual.

Javier de Lorenzo

EN EL PROXIMO NUMERO DE JULIO 2009

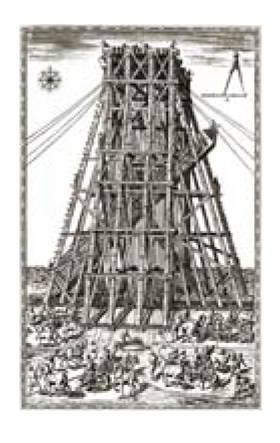


¿Qué nos hace humanos?,

por Katherine S. Pollart

La comparación entre el genoma humano y el de chimpancé revela ciertas regiones del ADN que nos son propias.

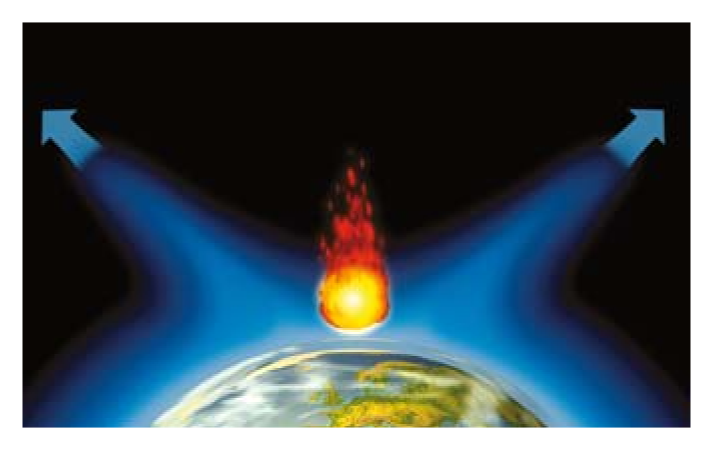




La revolución de Galileo y la transformación de la ciencia,

por Jürgen Renn

El giro intelectual de principios del siglo XVII que marcó el comienzo de las ciencias modernas y, en particular, de la astronomía moderna, está inseparablemente ligado al nombre de Galileo Galilei.



Fugas en atmósferas planetarias,

por David C. Catling y Kevin J. Zahnle

La atmósfera terrestre se va escapando lentamente hacia el espacio. ¿Se parecerá cada vez más a Venus nuestro planeta?

Cromosomas parásitos,

por Josefa Cabrero y Juan Pedro M. Camacho

Los cromosomas parásitos invaden los genomas eucariotas. Se establece una carrera de armamentos caracterizada por la evolución, en ambas partes, de diversos mecanismos de ataque y defensa.



Crisis alimentarias, ¿una amenaza para la civilización?,

por Lester R. Brown

La escasez de alimentos en los países pobres podría provocar el hundimiento de sus gobiernos. El origen de esta amenaza para la estabilidad mundial se halla en la continua degradación del medio.

